



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

PIRANÓMETRO FOTOVOLTAICO

Alumno: Javier Marrodán Fernández

Tutor: Vicente Senosiáin Miquélez

Pamplona, 10 de febrero de 2012

Índice

1. Introducción.....	4
1.1 Las energías renovables	4
1.2 La energía solar	4
1.3 La radiación solar.....	5
2. Antecedentes y objetivos	7
2.1 Importancia de la medición de la radiación solar.....	7
2.1.1 Factores que influyen en la irradiancia	7
2.2 Tipos de radiación solar	8
2.3 Unidades de medida	8
2.4 Aparatos de medida	8
2.4.1 Piranómetro fotovoltaico.....	10
2.4.1.1 El efecto fotovoltaico.....	10
2.4.1.2 Ecuación característica de la célula solar	11
2.4.1.2.1 Influencia de la temperatura en la curva I/V	11
2.4.1.2.2 Influencia de la irradiancia en la curva I/V	12
3. Recopilación y presentación de datos	14
3.1 Célula fotovoltaica.....	14
3.2. Medición de la corriente de cortocircuito.....	14
3.2.1. Amperímetro como instrumento de medida	14
3.2.2. Pinza amperimétrica como instrumento de medida.....	15
3.2.3. Otras formas de medir la corriente de cortocircuito	16
3.3. Calibración de la célula.....	17
3.3.1. La estación meteorológica	17
3.3.2. Situación de la célula	19
3.3.3. Amplificación de la señal de la célula	20
3.3.3.1. Circuito de alimentación.....	20

3.3.3.2. Circuito de amplificación	21
4. Desarrollo del trabajo	25
4.1. Temperatura	25
4.2. Linealidad	28
4.3. Ángulo acimutal	29
4.4. Radiación directa y difusa	31
4.5. Ángulo de incidencia (error de coseno).....	32
5. Análisis de resultados	39
6. Posibles aplicaciones	43
7. Estudio económico.....	44
7.1. Piranómetro “comercial”	44
7.2. Piranómetro fotovoltaico	45
8. Conclusiones	47
9. Bibliografía	48

1. Introducción

1.1 Las energías renovables

La generación, transporte y uso de la energía es una de las actividades del hombre con mayor repercusión en el Medio Ambiente.

Sin embargo, frente a las fuentes convencionales, las energías renovables, recursos limpios e inagotables que nos proporciona la naturaleza, tienen un impacto prácticamente nulo y siempre reversible.

Las energías renovables, además, por su carácter autóctono contribuyen a disminuir la dependencia de nuestro país de los suministros externos, aminoran el riesgo de un abastecimiento poco diversificado y favorecen el desarrollo tecnológico y la creación de empleo.

El conjunto de las energías renovables comparten la misma fuente, el sol.

- Así, el calentamiento de la tierra y del agua provoca las diferencias de presión que dan origen al viento, fuente de la energía eólica.
- El sol es el agente principal del ciclo del agua, que convierte la evaporación de los océanos en lluvia y, por lo tanto, en el recurso de la energía hidráulica.
- El sol es el actor imprescindible del proceso de fotosíntesis y por ello origen principal de la energía que utiliza la biomasa.
- El sol es la fuente directa de la que se abastecen la energía solar térmica y fotovoltaica

1.2 La energía solar

El sol es, por lo tanto, la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta. Localizado a una distancia media de 150 millones de kilómetros tiene un radio de 109 veces el de la Tierra y está formado por gas a muy alta temperatura. En su núcleo se producen continuamente reacciones atómicas de fusión nuclear que convierten el hidrógeno en helio. Este proceso libera gran cantidad de energía que sale hasta la superficie visible del Sol (fotosfera), y escapa en forma de rayos solares al espacio exterior.

Se calcula que en el interior del Sol se queman cada segundo unos 700 millones de toneladas de hidrógeno, de las que 4,3 millones se transforman en energía. Una parte importante de esta energía se emite a través de los rayos solares al resto de planetas, lunas, asteroides y cometas que componen nuestro sistema solar. Más concretamente hasta la Tierra llega una cantidad de energía solar equivalente a $1,7 \times 10^{14}$ kW, lo que representa la potencia correspondiente a 170 millones de reactores nucleares de 1.000 MW de potencia eléctrica unitaria, o lo que es lo mismo, 10.000 veces el consumo energético mundial.

Si tenemos en cuenta que las previsiones actuales apuntan a que, en los próximos 6.000 millones de años, el Sol tan solo consumirá el diez por ciento del hidrógeno que contiene en su interior, podemos asegurar que disponemos de una fuente de energía gratuita, asequible a todos (cualquier país puede disponer de ella) y respetuosa con el medio ambiente, por un periodo de tiempo prácticamente ilimitado.

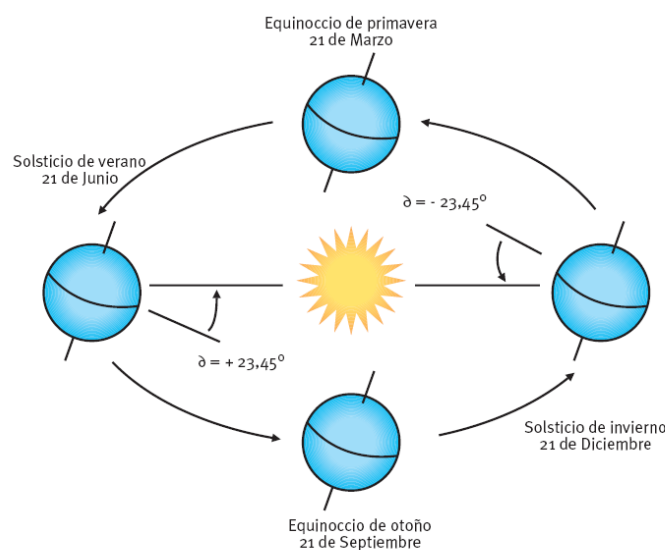
1.3 La radiación solar

Cualquier persona que quiera aprovechar la energía solar debe ser capaz, en primer lugar, de responder a la pregunta de qué cantidad de energía llegará al lugar donde prevé realizar la captación; o sea, qué irradiancia solar recibirá por unidad de superficie. Para ello, habrá que empezar por saber qué es y cómo se comporta la radiación solar, así como cuánta energía es posible captar en función de la región del mundo en la que nos encontremos.

Como punto de partida debemos tener en cuenta que la luz es una de las formas que adopta la energía para trasladarse de un lugar a otro. En el caso del Sol, los rayos solares se propagan a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas de energía. Este fenómeno físico, más conocido como radiación solar, es el responsable de que nuestro planeta reciba un aporte energético continuo de aproximadamente 1.367 W/m^2 . Un valor que recibe el nombre de constante solar y que, al cabo de un año, equivaldría a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles del mundo (petróleo, carbón...).

Sin embargo, no toda la radiación que llega hasta la Tierra sobrepasa las capas altas de la atmósfera. Debido a los procesos que sufren los rayos solares cuando entran en contacto con los diferentes gases que componen la atmósfera, una tercera parte de la energía solar interceptada por la Tierra vuelve al espacio exterior, mientras que las dos terceras partes restantes penetran hasta la superficie terrestre. Este hecho se debe a que las proporciones de vapor de agua, metano, ozono y dióxido de carbono (CO_2) actúan como una barrera protectora. Una capa de protección que, entre otras cosas, permite que no se produzcan cambios de temperatura demasiado extremos en la superficie terrestre, así como que exista agua líquida desde hace miles de millones de años.

A la pérdida de aporte energético que se produce en las capas superiores de la atmósfera hay que añadir otras variables que influyen en la cantidad de radiación solar que llega hasta un punto determinado del planeta. Como es de imaginar, no todas las superficies reciben la misma cantidad de energía. Así, mientras los polos son los que menor radiación reciben, los trópicos son los que están expuestos a una mayor radiación de los rayos solares. Esto tiene su explicación en el grado de inclinación de nuestro planeta con respecto al Sol ($23,5^\circ$). La intensidad de radiación no será igual cuando los rayos solares estén perpendiculares a la superficie irradiada que cuando el ángulo de incidencia sea más oblicuo, tal y como ocurre en los polos.



La declinación del Sol, pues, es la razón de que los mayores valores de radiación no se produzcan en el ecuador sino en latitudes por encima y por debajo de los trópicos de Cáncer y Capricornio. En estas zonas es donde los rayos solares son más perpendiculares y atraviesan una capa atmosférica más fina hasta llegar a su destino.

Pero para establecer, con exactitud, la cantidad de energía que se puede aprovechar en un sitio concreto, también habrá que tener en cuenta otros aspectos como la hora del día, la estación del año y muy especialmente las condiciones atmosféricas. En los días nublados disminuirá considerablemente la intensidad de la radiación y por lo tanto el aporte energético que pueda recibir una instalación de energía solar. Aunque la relación entre las variaciones en la nubosidad y la radiación solar es compleja, probablemente este factor es el más importante a la hora de poder calcular la energía que llega a un punto concreto de la superficie terrestre.

Esto no quiere decir que en zonas donde hay menos horas de sol, como el norte de Europa, la energía solar constituya un aporte energético desdeñable. La suma de la radiación solar directa y la radiación difusa en ciudades como Berlín, Hamburgo o Zurich alcanzan valores medios de 1.000 kWh/m² lo que equivale, para hacernos una idea, a entre 110 y 115 litros de gasolina por m² y año. Por radiación solar directa entendemos aquella que llega a la superficie sin haber sufrido cambios de dirección (por ejemplo, la luz cegadora al mirar el Sol), mientras que con radiación difusa nos referimos a la que llega a la superficie sin orientación determinada (días cubiertos).

La suma de todas las variables anteriormente mencionadas nos permiten conformar el mapa solar de una región determinada del planeta y establecer qué cantidad de energía media podremos captar para su uso en el ámbito doméstico, industrial, etc.

En el caso concreto de España se juntan todos los requisitos para ser uno de los países europeos con mayor capacidad para recoger la energía del Sol: una situación geográfica privilegiada, con una climatología envidiable. Situada entre los 36° y los 44° latitud Norte, recibe una intensidad de radiación solar muy superior a la de otras regiones del planeta (incluso por encima de las zonas ecuatoriales). Además, España se ve particularmente favorecida con respecto a otros países de Europa por la gran cantidad de días sin nubes que disfruta al año. No en vano, sobre cada metro cuadrado de suelo inciden al año una media de 1.500 kWh de energía, cifra similar a la de muchas regiones de América Central y del Sur.

2. Antecedentes y objetivos

2.1 Importancia de la medición de la radiación solar

Las inversiones en energía solar son rentables sí, y solo sí, planteamos el proyecto en un área en donde haya un nivel alto de radiación solar y ésta perdure por varias horas del día; este negocio resulta rentable en países como Australia, España, Japón o Argentina, pero no en lugares como Finlandia o Gran Bretaña en donde la presencia del sol es escasa.

Además de para la generación de energía, el conocimiento de la radiación es importante para un amplio rango de aplicaciones, en el sector de la agricultura o la ingeniería entre otros, destacándose el monitoreo del efecto en el crecimiento de las plantas, análisis de la evaporación e irrigación, arquitectura y diseño de edificios, diseño y uso de sistemas de calentamiento solar, implicaciones en la salud (p.e. cáncer de piel), modelos de predicción del tiempo y el clima, etc. Es importante por eso tomar en cuenta los diferentes factores que influyen en la cantidad de radiación solar.

2.1.1 Factores que influyen en la irradiancia

Los niveles de radiación en la superficie terrestre dependen de varios factores como son: la posición del sol, la altitud, la latitud, el cubrimiento de las nubes, la cantidad de ozono en la atmósfera y la reflexión terrestre.

Los niveles de radiación varían durante el día y a lo largo del año, presentándose los mayores niveles en el día cuando el sol se encuentra en su máxima elevación, esto es entre las 10 a.m. y las 2 p.m. (cerca del 60% de la radiación es recibida a estas horas), mientras que, cuando el ángulo del sol está más cercano al horizonte llega menos radiación a la superficie de la Tierra debido a que atraviesa una distancia más larga en la atmósfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a una mayor absorción. En zonas diferentes a los trópicos los máximos niveles se presentan en los meses de verano alrededor del mediodía.

La altitud también determina la cantidad de radiación que se recibe, debido a que en zonas de alta montaña el aire es más limpio y más delgada la capa atmosférica que deben recorrer los rayos solares, de manera que a mayor altitud mayor radiación. En promedio, por cada 1000 metros de incremento de la altitud, la radiación aumenta entre un 10% a un 12%. Las nubes pueden tener un impacto importante en la cantidad de radiación que recibe la superficie terrestre, generalmente las nubes densas bloquean más radiación que una nube delgada.

La radiación varía de acuerdo con la ubicación geográfica; sobre la zona ecuatorial los rayos solares caen más directamente que en las latitudes medias y la radiación solar resulta ser más intensa en esa área.

Las condiciones de lluvia también reducen la cantidad de radiación. La contaminación trabaja en forma similar que las nubes, de tal forma que la contaminación urbana reduce la cantidad de radiación que llega a la superficie de la tierra.

La cantidad de radiación, particularmente la ultravioleta, que llega a la superficie de un lugar, está inversamente relacionada con el ozono total: a menor cantidad de ozono mayor radiación UV ingresa a la superficie.

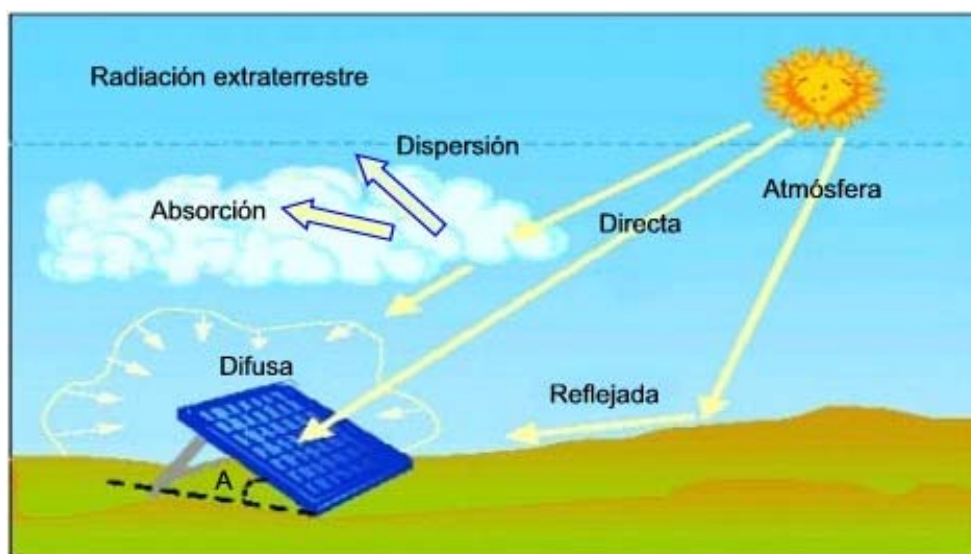
La radiación reflejada puede producir los mismos efectos que la radiación que llega a la superficie de la Tierra. La nieve es la superficie que más refleja radiación, alcanzando hasta un 80%, mientras que la arena seca de playa el 15% y el agua de mar el 25%.

2.2 Tipos de radiación solar

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento, la radiación solar alcanza la superficie terrestre, oceánica y continental, que la refleja o la absorbe.

La radiación que finalmente llega a la superficie de la tierra se clasifica en:

- Radiación directa: radiación que llega a la superficie de la tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección.
- Radiación difusa: componente de la radiación solar que al encontrar pequeñas partículas en su camino hacia la tierra, es difundida en todas las direcciones.
- Radiación global: toda la radiación que llega a la tierra, resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa.



2.3 Unidades de medida

Para cuantificar la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra definiremos los siguientes conceptos:

- Irradiancia: potencia incidente por unidad de superficie, medida en W/m^2 .
- Irradiación: energía incidente por unidad de superficie en un determinado periodo de tiempo, se mide en J/m^2 .

2.4 Aparatos de medida

Existen en el mercado multitud de aparatos para medir las diferentes variables solares:

- Pirheliómetro: es un instrumento para medición de la radiación solar directa a incidencia normal. Estos son, pirheliómetros primarios (patrón) y pirheliómetros secundarios, calibrados por referencia a uno primario.
- Piranómetro: es un instrumento para medición de la radiación solar que emana de todo un hemisferio. Se utiliza para mediciones de radiación global y, junto con una pantalla circular, para mediciones de radiación celeste.

- Pirgeómetro: es un instrumento para medición de la radiación atmosférica neta sobre una superficie negra horizontal orientada hacia arriba, a la temperatura del aire ambiente.
- Pirradiómetro: es un instrumento para medir la radiación solar y terrestre. Un pirradiómetro neto es un instrumento para medir flujo neto de radiación total hacia abajo y hacia arriba, a través de una superficie horizontal.

Puesto que el objetivo del proyecto es la construcción de un aparato que mida la radiación global, nos centraremos en el piranómetro. Dependiendo del principio físico por el que actúan sus sensores, los piranómetros se pueden dividir en:

- Termomecánicos: Un par de cintas metálicas que posean diferentes coeficientes de dilatación térmica se unen mecánicamente formando una cinta, pero manteniéndolas aisladas térmicamente entre si. La que posee mayor coeficiente es recubierta por una pintura altamente absorbente (no selectiva) de la radiación solar y se expone al sol. La otra recubierta con un material reflectante se la mantiene protegida de la radiación solar. El resultado es que el conjunto se deforma curvándose en proporción a la cantidad de radiación que recibe. Esta deformación medida por métodos ópticos o mecánicos permite calcular la intensidad de la radiación que llega a la superficie detectora.
- Termoeléctricos: se constituye por una pila termoeléctrica contenida en un alojamiento con dos semiesferas de cristal. La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares.

El piranómetro termoeléctrico es el más usado comercialmente, se caracteriza por tener una alta precisión y sensibilidad “plana” (le afectan en menor medida las condiciones exteriores como nubosidad, contaminación, etc.), por otro lado, no es muy sensible a pequeñas irregularidades en el nivel de radiación debido a la inercia térmica.



- Fotovoltaicos: utilizan como sensor una célula fotoeléctrica. Se explica en el punto 2.4.1

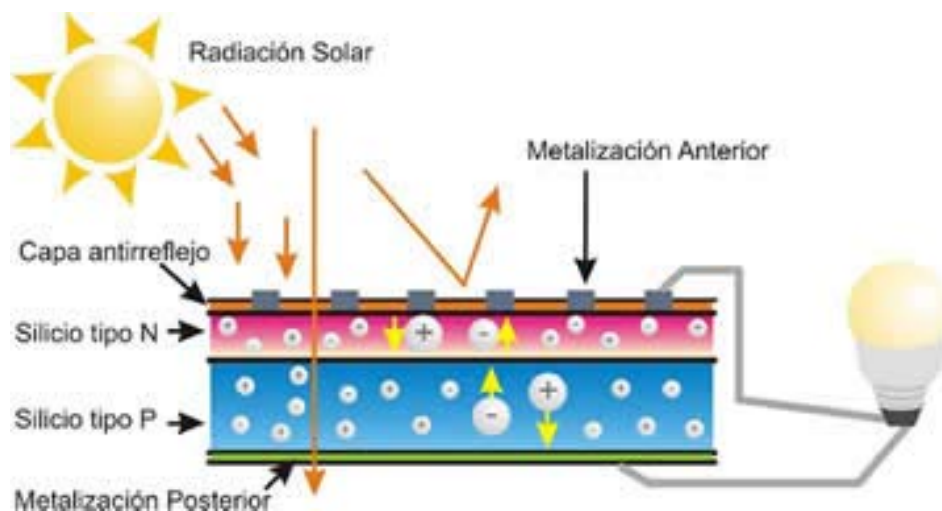
2.4.1 Piranómetro fotovoltaico

2.4.1.1 El efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV, pueden ser reflejados o absorbidos, o pueden pasar a su través. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.



Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentemente dopadas (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Es por ello que estas células se fabrican a partir de este tipo de materiales, es decir, materiales que actúan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se aumenta la energía. Además de los semiconductores las células solares están formadas por una malla metálica superior u otro tipo de contacto para recolectar los electrones del semiconductor y transferirlos a la carga externa y un contacto posterior para completar el circuito eléctrico. También en la parte superior de la célula hay un vidrio u otro tipo de material encapsulante transparente para sellarla y protegerla de las condiciones ambientales, y una capa antirreflexiva para aumentar el número de fotones absorbidos.



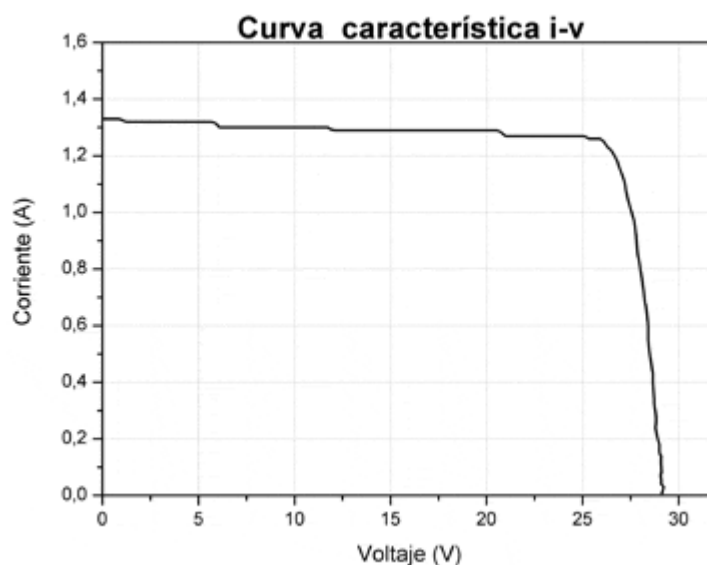
2.4.1.2 Ecuación característica de la célula solar

La siguiente ecuación representa todos los pares de valores (I/V) en que puede trabajar una célula fotovoltaica:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right]$$

donde:

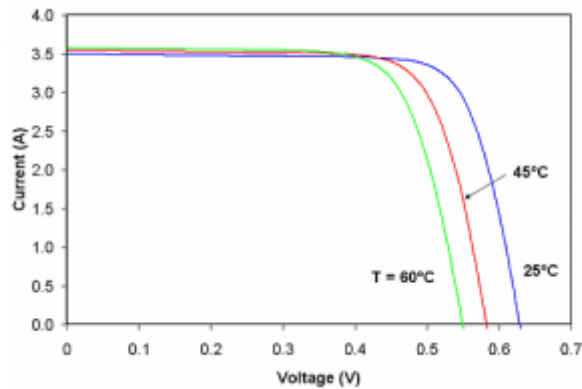
- I, V: corriente y tensión proporcionadas por la célula
- T: temperatura de la célula (en grados Kelvin)
- I_L : corriente “fotogenerada”, corriente generada como consecuencia de la incidencia de fotones sobre el material. Es directamente proporcional a la irradiancia.
- I_0 , m: parámetros relacionados con la unión de los dos tipos de semiconductores.
- q, k: dos constantes (carga del electrón, constante de Boltzman).



Cada uno de los puntos de la curva representa un punto de funcionamiento de la célula, que vendrá determinado por la carga externa y por las condiciones de irradiancia y temperatura.

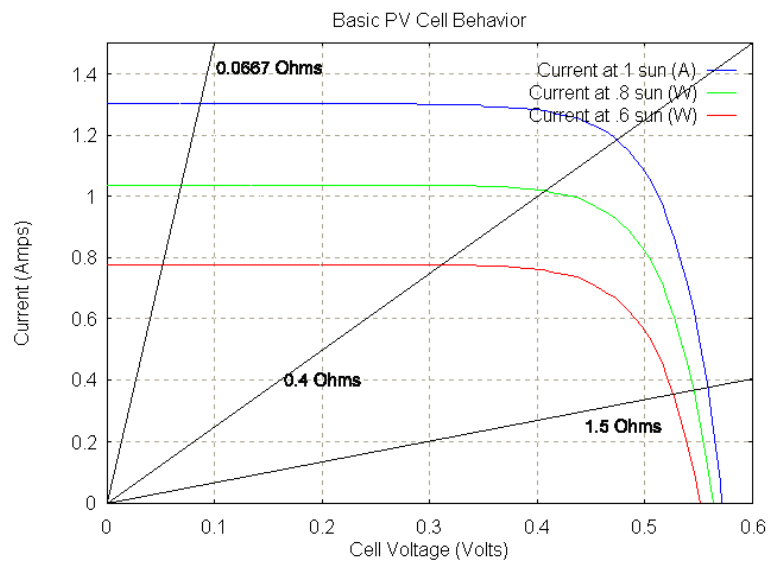
2.4.1.2.1 Influencia de la temperatura en la curva I/V

Muchas veces se piensa que un panel solar tiene un mejor rendimiento a altas temperaturas, cuando realmente ocurre lo contrario. Debido a que la conductividad de los semiconductores aumenta al aumentar la temperatura (los electrones son más móviles), el campo eléctrico se aleja de la capa límite, por lo que la carga no puede seguir estando bien separada. El resultado es una disminución de la tensión entre las dos capas.



2.4.1.2.2 Influencia de la irradiancia en la curva I/V

El aumento de la irradiancia se transmite a la célula con un aumento en el nivel de corriente (proporcional, cuando funciona en cortocircuito).



Como se aprecia en la gráfica anterior, la célula seguiría trabajando en cortocircuito, aún con cargas resistivas de baja magnitud.

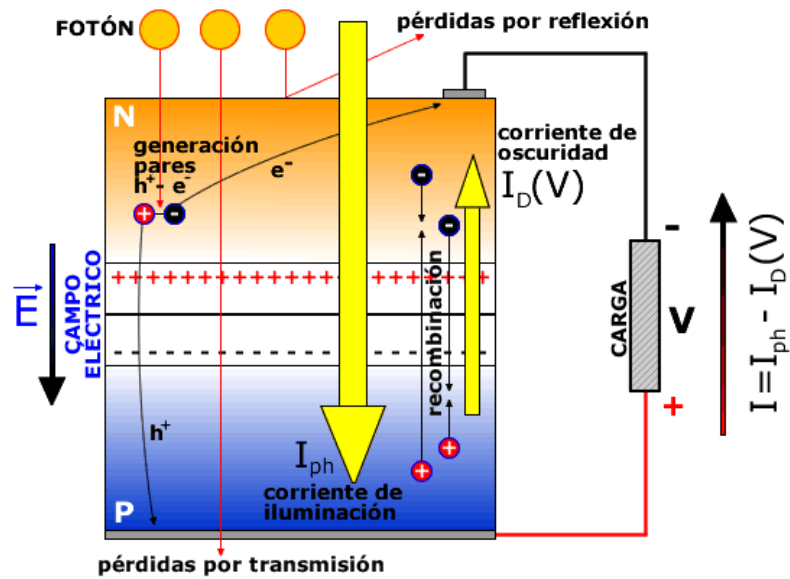
Analizando la ecuación característica vemos que la corriente entregada a una carga por una célula solar es el resultado neto de dos componentes internas de corriente que se oponen:

- Corriente de iluminación: debida a la generación de portadores que produce la iluminación.

$$I_{PH} = I_L$$

- Corriente de oscuridad: debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

$$I_D(v) = I_0 \left[e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right]$$



En cortocircuito la corriente de oscuridad es 0, entonces:

$$I = I_{PH}$$

Por lo tanto, haciendo funcionar a la célula en cortocircuito, obtendremos una magnitud (la corriente de cortocircuito) proporcional a la irradiancia.

3. Recopilación y presentación de datos

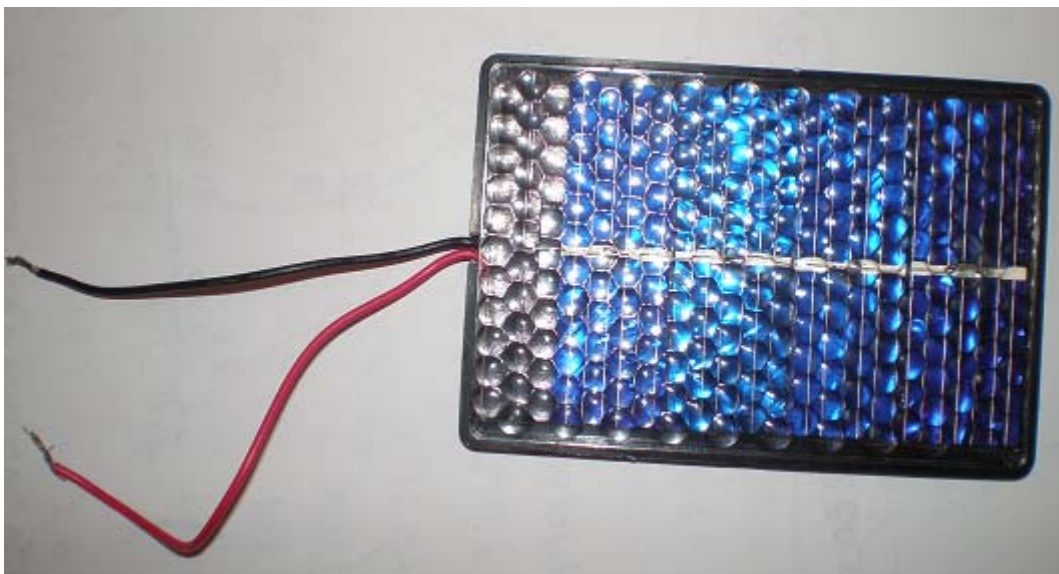
3.1 Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica que va a funcionar como sensor de radiación es de silicio policristalino y sus dimensiones son 75 x 60 mm, está situada dentro de una carcasa de plástico con un cristal que la protege de las condiciones meteorológicas, éste cristal está formado por pequeñas lentes de aumento que maximizan el rendimiento de la célula. Sus dimensiones totales son 95 x 65 mm.

Sus valores nominales son:

$$I_N = 800 \text{ mA}$$

$$V_N = 0,5 \text{ V}$$

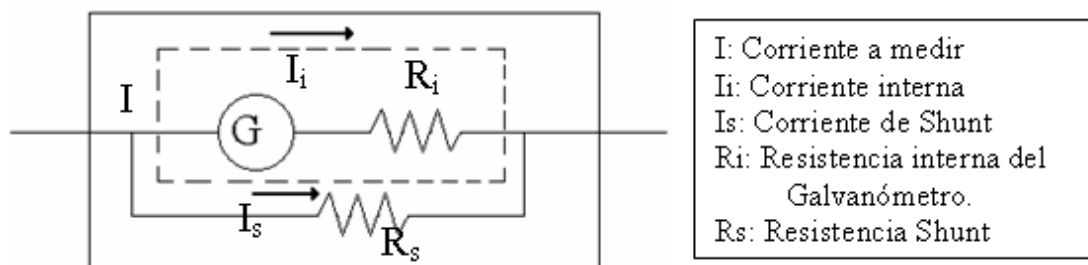


3.2. Medición de la corriente de cortocircuito

Como hemos visto en el punto anterior, la corriente de cortocircuito es la única magnitud de la célula fotovoltaica que varía proporcionalmente con la irradiancia que ésta recibe, el objetivo es por lo tanto medir ésta corriente sin que la medición afecte al comportamiento de la célula. Es conveniente recordar que debido al efecto fotovoltaico, la célula genera corriente continua.

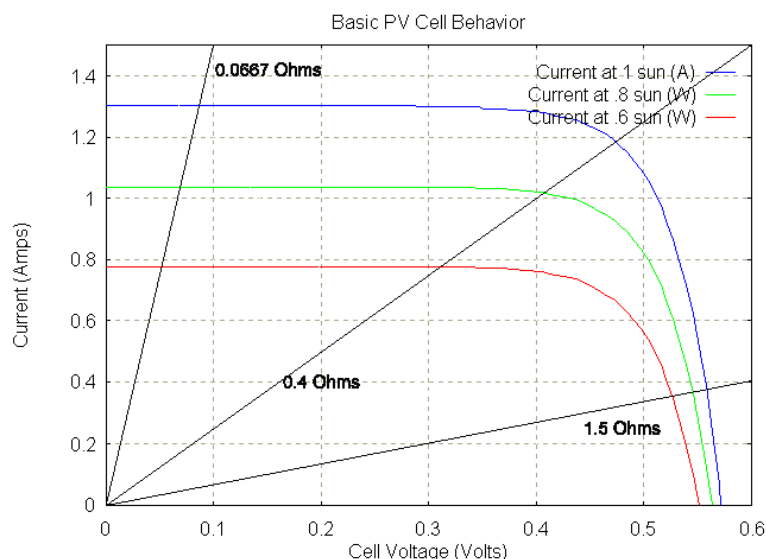
3.2.1. Amperímetro como instrumento de medida

Si hablamos en términos básicos, el amperímetro es un simple galvanómetro (instrumento para detectar pequeñas cantidades de corriente) con una resistencia en paralelo, llamada shunt. Disponiendo de una gama de resistencias shunt, podemos disponer de un amperímetro con varios rangos o intervalos de medición. Los amperímetros tienen una resistencia interna muy pequeña, por debajo de 1 ohmio con la finalidad de que su presencia no disminuya la corriente a medir cuando se conecta a un circuito eléctrico.



Para medir la corriente que circula por un circuito tenemos que conectar el amperímetro en serie con la fuente de alimentación y con el receptor de corriente. Así, toda la corriente que circula entre esos dos puntos va a pasar antes por el amperímetro. Estos aparatos tienen una bobina móvil que está fabricada con un hilo muy fino (aproximadamente 0,05 mm de diámetro) y cuyas espiras, por donde va a pasar la corriente que queremos medir, tienen un tamaño muy reducido. Por todo esto, podemos decir que la intensidad de corriente, que va a poder medir un amperímetro cuyo sistema de medida sea magnetoeléctrico, va a estar limitada por las características físicas de los elementos que componen dicho aparato. El valor límite de lo que podemos medir sin temor a introducir errores va a ser alrededor de los 100 miliamperios, luego la escala de medida que vamos a usar no puede ser de amperios sino que debe tratarse de miliamperios. Para aumentar la escala de valores que se puede medir podemos colocar resistencias en derivación, pudiendo llegar a medir amperios (aproximadamente hasta 300 amperios). Las resistencias en derivación pueden venir conectadas directamente en el interior del aparato o podemos conectarlas nosotros externamente.

Utilizando un amperímetro para medir la corriente de cortocircuito de la célula, se observan errores en las medidas, esto es debido a que la resistencia interna del amperímetro ($\approx 1\Omega$) hace que la célula no funcione en la zona de cortocircuito, provocando una lectura errónea.



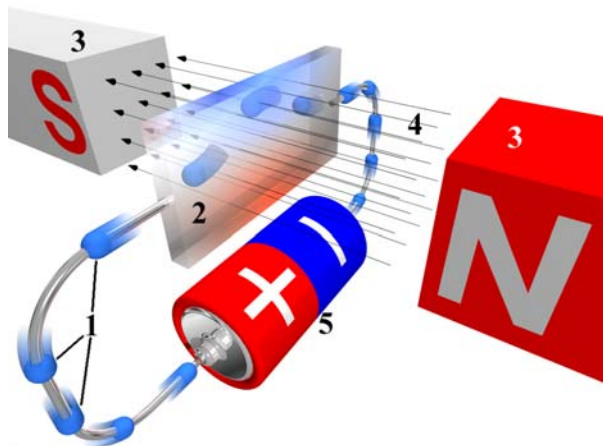
3.2.2. Pinza amperimétrica como instrumento de medida

La pinza amperimétrica es un tipo especial de amperímetro que permite obviar el inconveniente de tener que abrir el circuito en el que se quiere medir la corriente para colocar un amperímetro clásico.



El funcionamiento de la pinza se basa en la medida indirecta de la corriente circulante por un conductor a partir del campo magnético que dicha circulación de corriente genera. Sólo una corriente variable (alterna) generaría un campo magnético variable capaz de inducir una f.e.m. en las espiras de la pinza, por lo tanto según su principio de funcionamiento la pinza sólo sería capaz de medir corriente alterna. Sin embargo, existen pinzas amperimétricas capaces de medir corriente continua gracias al efecto hall:

“En un conductor por el que circula una corriente, en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, aparece una separación de cargas que da lugar a un campo eléctrico en el interior del conductor perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado .A este campo eléctrico se le llama campo Hall.”



Estas pinzas son más caras y no ofrecen una buena precisión para bajos niveles de corriente, por lo tanto no son válidas para medir la corriente de cortocircuito de la célula.

3.2.3. Otras formas de medir la corriente de cortocircuito

Como se ha visto anteriormente, la corriente de la célula sigue siendo proporcional a la irradiancia si en vez de cortocircuitarla ponemos una carga resistiva muy baja ($<100 \text{ m}\Omega$), por lo tanto midiendo la tensión sobre esa carga conoceríamos la corriente de cortocircuito.

El objetivo pasa a ser entonces la medición de esa tensión ($\approx 50 \text{ mV}$). Si intentamos medir un voltaje tan pequeño directamente con el multímetro se obtienen los mismos errores que cuando

se intentaba medir la corriente, puesto que el principio de funcionamiento del aparato es el mismo y se mantienen los errores de precisión.

La solución consiste en amplificar esa señal por medio de amplificadores operacionales y de este modo conseguir medir la señal con los aparatos convencionales sin que estos afecten a la medida.

3.3. Calibración de la célula

Para calibrar la medición de la radiación y comprobar que el circuito de amplificación funciona correctamente se va a comparar la señal de la célula con los datos de una estación meteorológica en la que hay instalado un piranómetro.

3.3.1. La estación meteorológica

La localización de la estación meteorológica con la que se va a calibrar la célula es la siguiente:

- Latitud: $42^{\circ} 49' 4''$
- Longitud: $-1^{\circ} 38' 18''$
- Altura: 455 m

Está situada en el Baluarte de Labrit, en la parte Noreste de Pamplona.





La estación meteorológica ofrece datos en tiempo real de temperatura, humedad relativa, **radiación global**, velocidad y dirección del viento, insolación y precipitación.

Los datos se pueden consultar en la página web <http://meteo.navarra.es>

Fecha	Temperatura	Humedad relativa	Radiación global	Insolación	Precipitación	Velocidad viento 10 m	Velocidad viento 10 m	Dirección viento 10 m
	°C	%	W/m ²	s	l/m ²	m/s	km/h	°
30/08/2011 0:00	14.4	79	0.0	0	0.0	1.0	3.4	47
30/08/2011 0:10	14.2	80	0.0	0	0.0	0.9	3.2	15
30/08/2011 0:20	14.5	79	0.0	0	0.0	0.8	2.8	27
30/08/2011 0:30	14.4	81	0.0	0	0.0	0.3	1.0	86
30/08/2011 0:40	14.1	81	0.0	0	0.0	0.2	0.7	107
30/08/2011 0:50	14.4	81	0.0	0	0.0	0.2	0.8	62
30/08/2011 1:00	14.1	82	0.0	0	0.0	0.1	0.3	52
30/08/2011 1:10	14.0	82	0.0	0	0.0	0.1	0.5	127
30/08/2011 1:20	14.0	82	0.0	0	0.0	0.1	0.2	56
30/08/2011 1:30	13.8	83	0.0	0	0.0	0.2	0.5	25
30/08/2011 1:40	13.8	83	0.0	0	0.0	0.1	0.2	343
30/08/2011 1:50	13.7	84	0.0	0	0.0	0.1	0.2	100
30/08/2011 2:00	13.9	84	0.0	0	0.0	0.5	1.8	127
30/08/2011 2:10	13.8	84	0.0	0	0.0	0.9	3.3	125
30/08/2011 2:20	13.9	84	0.0	0	0.0	0.8	2.8	118
30/08/2011 2:30	13.9	84	0.0	0	0.0	0.9	3.3	114
30/08/2011 2:40	13.4	84	0.0	0	0.0	0.6	2.3	114
30/08/2011 2:50	13.4	84	0.0	0	0.0	0.6	2.2	134
30/08/2011 3:00	13.4	85	0.0	0	0.0	0.3	1.2	138
30/08/2011 3:10	13.3	85	0.0	0	0.0	0.3	1.0	107
30/08/2011 3:20	13.2	86	0.0	0	0.0	0.8	3.0	112
30/08/2011 3:30	13.0	86	0.0	0	0.0	1.2	4.2	104
30/08/2011 3:40	13.0	85	0.0	0	0.0	0.8	3.0	113
30/08/2011 3:50	13.0	86	0.0	0	0.0	0.8	2.7	119
30/08/2011 4:00	12.9	86	0.0	0	0.0	1.0	3.7	122
30/08/2011 4:10	12.7	86	0.0	0	0.0	1.2	4.2	109
30/08/2011 4:20	12.5	86	0.0	0	0.0	1.1	3.9	106
30/08/2011 4:30	12.2	86	0.0	0	0.0	1.2	4.4	119
30/08/2011 4:40	12.4	86	0.0	0	0.0	1.4	4.9	116
30/08/2011 4:50	12.3	87	0.0	0	0.0	1.3	4.8	110
30/08/2011 5:00	12.4	87	0.0	0	0.0	1.2	4.2	107
30/08/2011 5:10	12.4	87	0.0	0	0.0	1.4	5.2	114
30/08/2011 5:20	12.2	87	0.0	0	0.0	1.1	3.8	85
30/08/2011 5:30	11.9	87	0.0	0	0.0	1.2	4.2	100
30/08/2011 5:40	11.9	87	0.0	0	0.0	0.8	2.9	106
30/08/2011 5:50	12.1	87	6.8	0	0.0	0.7	2.6	107
30/08/2011 6:00	12.3	86	33.6	0	0.0	0.8	3.0	106
30/08/2011 6:10	12.3	85	54.0	0	0.0	0.8	3.0	93
30/08/2011 6:20	12.8	84	77.5	0	0.0	0.9	3.4	89
30/08/2011 6:30	13.4	82	103.1	0	0.0	0.9	3.1	88
30/08/2011 6:40	13.5	80	131.5	136	0.0	1.3	4.8	88

La estación ofrece datos cada diez minutos, tras consultar el método de cálculo de los valores con los responsables de la estación, sabemos que el piranómetro registra un valor de radiación cada dos segundos y después hace una media de los últimos 10 minutos. Por ejemplo si la radiación a las 15:00 horas es de 650 W/m², éste valor es la media de las 300 mediciones (una cada dos segundos) entre las 14:50 horas y las 15:00 horas.

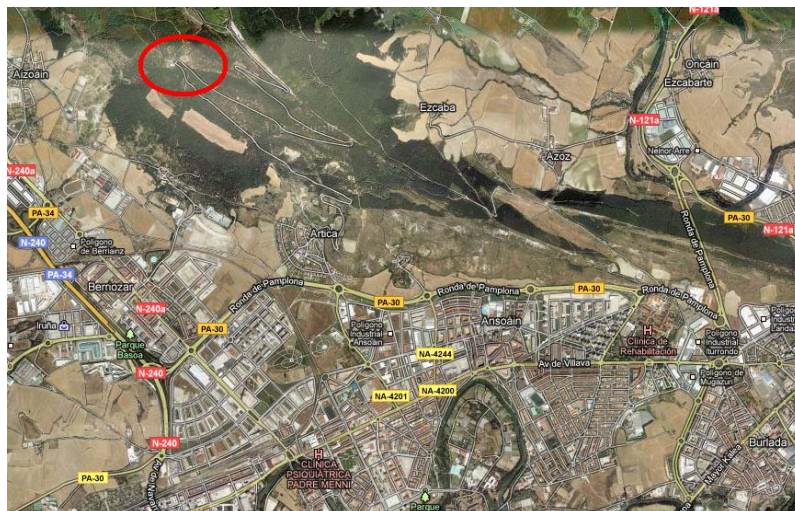
3.3.2. Situación de la célula

Para comprobar si la señal de la célula ofrece datos válidos, se deben tener en cuenta algunos factores a la hora de realizar la medición.

- Ausencia de nubosidad: se puede dar el caso de que la célula no reciba directamente radiación solar por el hecho de estar cubierta por las nubes y el cielo donde se ubica el piranómetro de la estación se encuentre despejado, o viceversa. Por éste motivo, la calibración de la célula solo se puede llevar a cabo en días despejados.
- Distancia a la estación meteorológica: lógicamente cuanto menor sea la distancia entre la célula y la estación, estaremos más seguros de que ambas reciben la misma radiación solar.

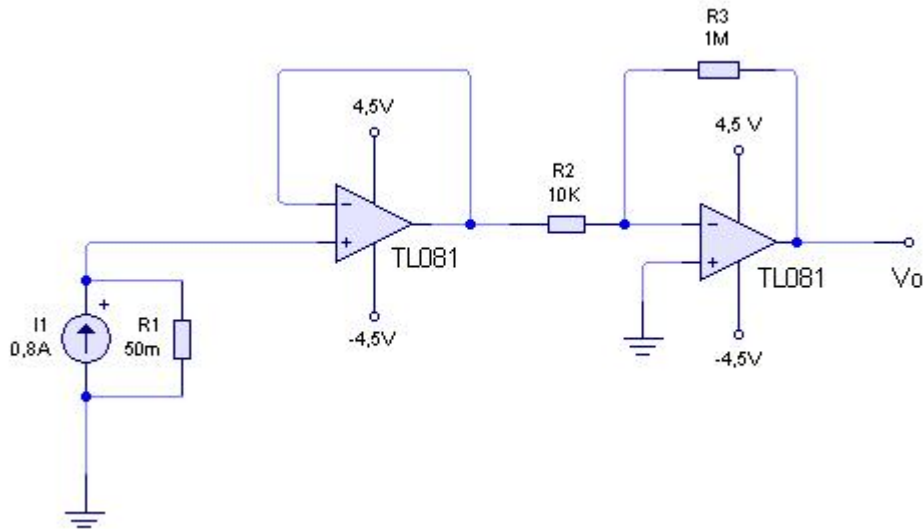
Por estos motivos se elije como punto de colocación de la célula la ladera del monte San Cristóbal, al norte de Pamplona, situada a 4,5 Km de la estación meteorológica y a una altura de 662 m. En días despejados ambas recibirán el mismo nivel de radiación ya que se encuentran a una distancia aceptable.

- Latitud: $42^{\circ} 51' 7''$
- Longitud: $-1^{\circ} 40' 9''$
- Altura: 662 m



3.3.3. Amplificación de la señal de la célula

Para acondicionar la señal vamos a utilizar un TL081 como amplificador inversor, con un seguidor de tensión a la entrada. Todo ello alimentado con +4,5/-4,5 V.



Para medir la tensión de la célula necesitamos ponerle una carga lo suficientemente pequeña para que siga funcionando en cortocircuito.

Recordando la ecuación característica de la célula:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right]$$

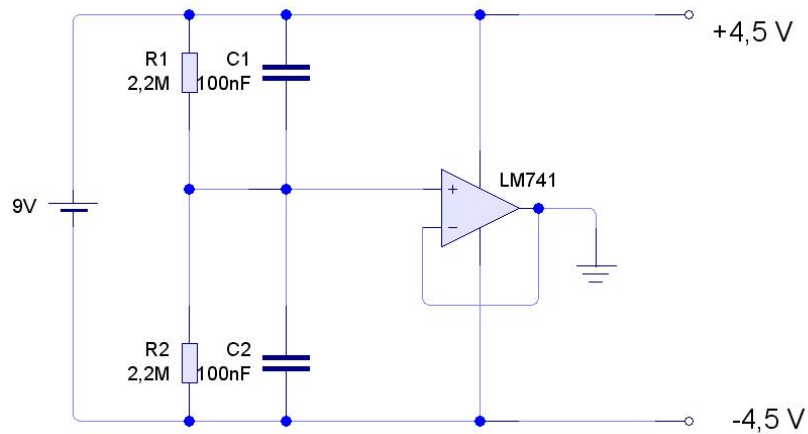
Para $V \leq 50 \text{ mV}$ se puede despreciar $I_0 \left[e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right]$, quedando $I = I_L$.

Por lo tanto, si colocamos una resistencia de $50 \text{ m}\Omega$ en paralelo con la célula, la célula seguirá funcionando en cortocircuito y podremos medir esa tensión. La resistencia de $50 \text{ m}\Omega$ se consigue con 20 resistencias de $1 \text{ }\Omega$ en paralelo.

$$V_{cc} = I_N * R = 0,8 * 0,05 = 40 \text{ mV}$$

3.3.3.1. Circuito de alimentación

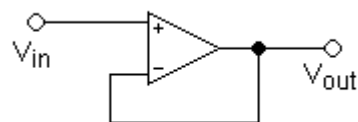
Para alimentar el circuito amplificador vamos a usar un divisor de tensión y un seguidor de tensión de este modo:



Los condensadores hacen que la señal de alimentación sea constante. De ésta forma conseguimos las tensiones +4,5/-4,5 V con las que alimentaremos el circuito de amplificación.

3.3.3.2. Circuito de amplificación

Para disminuir el efecto de las resistencias internas de los aparatos de medida, resistencias de cables, etc., se va a utilizar un seguidor de tensión.

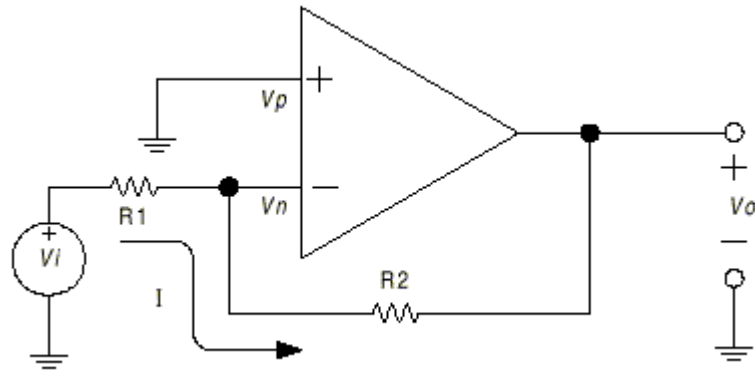


Las principales características del seguidor de tensión son:

- $V_{out} = V_{in}$
- $Z_{in} = \infty$
- $Z_{out} = 0$

Éste circuito es muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasa tanto por el sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones. Como la impedancia de entrada es mucho mayor que las propias del cableado, sensor, etc, se puede despreciar la caída de tensión que se produce en estos elementos.

Para amplificar la señal se va a utilizar un amplificador inversor:



Como está realimentado negativamente y la entrada positiva está conectada a tierra, tenemos tierra virtual en la entrada negativa ($V_p = V_n = 0$). Toda la tensión de entrada V_i , deberá aparecer en R_1 , obteniendo una corriente en R_1 :

$$I = \frac{V_i}{R_1}$$

Toda la corriente I que circula por R_1 pasará por R_2 , puesto que no se derivará ninguna corriente hacia la entrada del operacional (Impedancia infinita), así pues el producto de I por R_2 será igual a $-V_o$.

$$I = -\frac{V_o}{R_2}$$

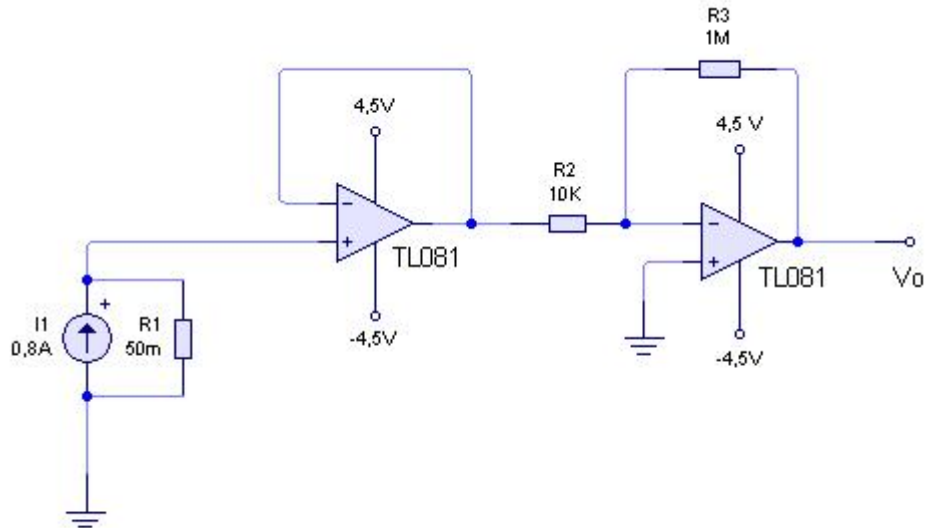
$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

$$V_o = -V_i \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

La ganancia se puede variar ajustando bien R_1 , o bien R_2 . Si R_2 varía desde cero hasta infinito, la ganancia variará también desde cero hasta infinito, puesto que es directamente proporcional a R_2 . La impedancia de entrada es igual a R_1 , y V_i y R_1 únicamente determinan la corriente I , por lo que la corriente que circula por R_2 es siempre I , para cualquier valor de dicha R_2 .

El circuito completo con la célula, el seguidor de tensión y el amplificador inversor queda de la siguiente manera:

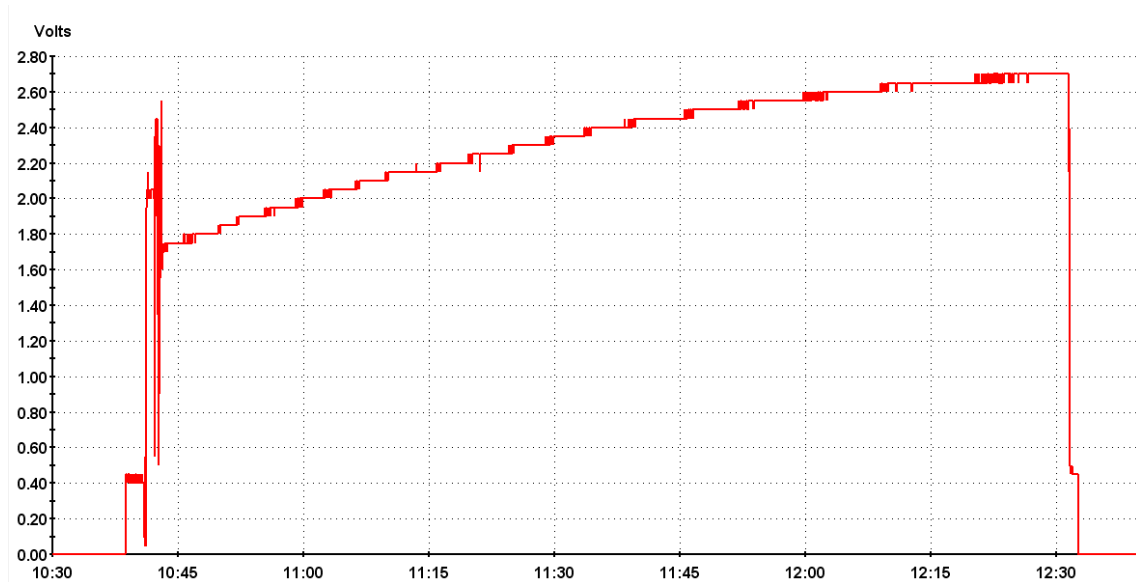


Queremos una ganancia de 100, por lo que la resistencia de alimentación negativa del amplificador inversor tiene que ser 100 veces mayor que la resistencia de entrada:

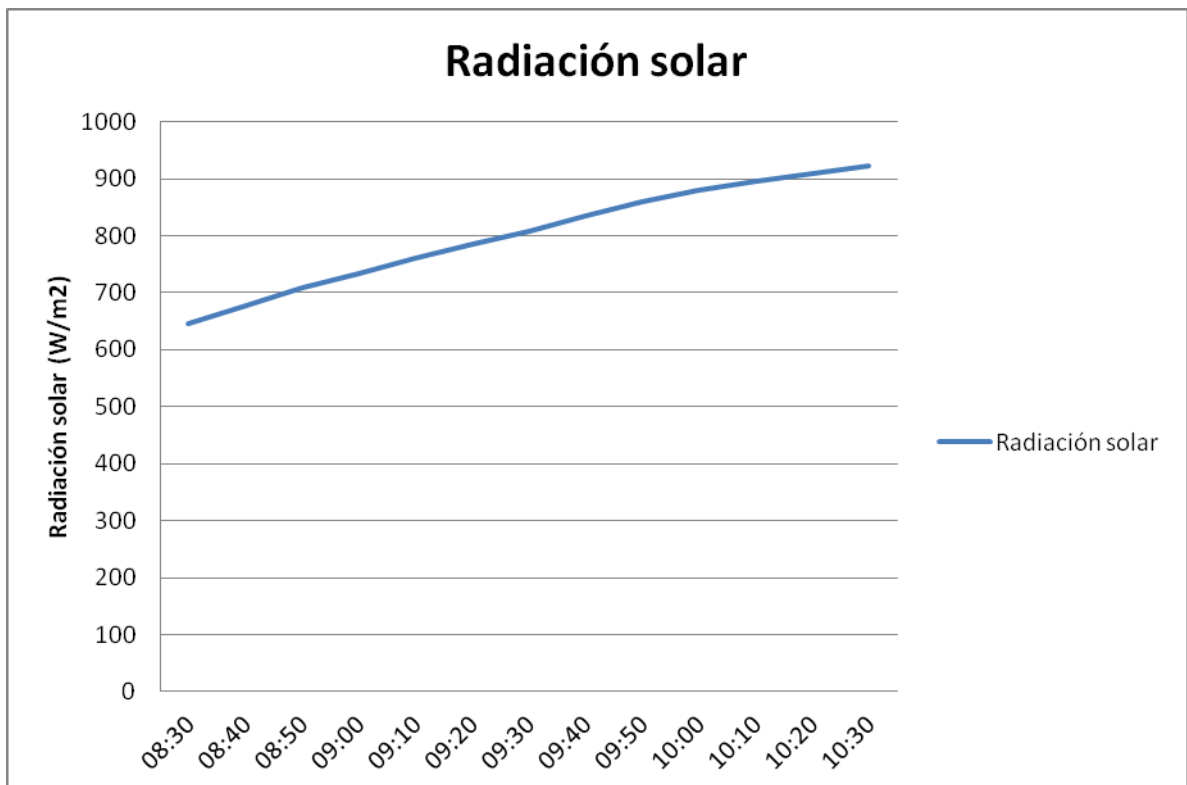
$$R_2 = 10\text{ K}\Omega$$

$$R_3 = 1\text{ M}\Omega$$

Conectando la célula y colocando el circuito en el punto de medición, los datos que ofrece el registrador de datos son:



Comparando los resultados con la medición de la estación meteorológica:



Se observa en ambas mediciones un aumento progresivo del nivel de radiación conforme se va acercando el mediodía, por lo tanto se decide usar este circuito para futuras mediciones.

Los datos de la estación meteorológica vienen en horario solar:

- Una hora menos que la hora oficial en horario de invierno.
- Dos horas menos que la hora oficial en horario de verano.

La medición se ha realizado en verano.

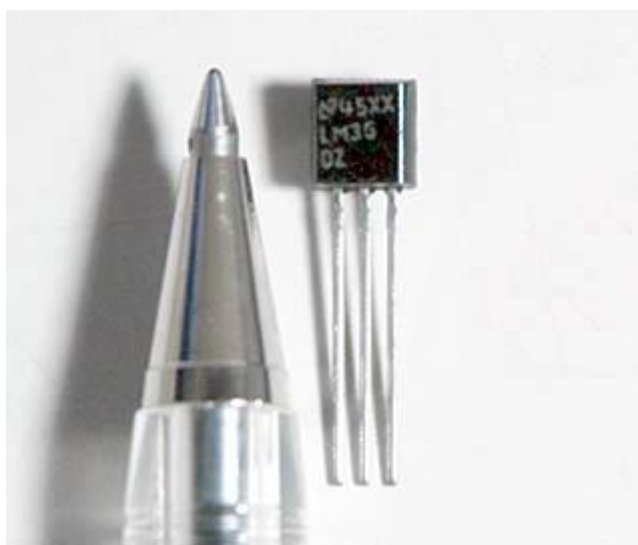
4. Desarrollo del trabajo

Una vez que tenemos el circuito que amplifica nuestra señal, vamos a comprobar que los datos que obtenemos son válidos. Existen multitud de factores que pueden distorsionar la medida (temperatura, ángulo de medición, etc), para obtener resultados válidos se deberá hacer un estudio de cómo afectan a la medida cada uno de estos efectos y si fuera necesario aplicar factores de corrección a la señal de salida. Las diferentes causas que afectan a la medida son:

4.1. Temperatura

El rango de temperatura al que puede estar sometido la célula puede ser muy amplio, desde 0° en invierno a 40° en verano, además cuando la célula reciba la luz del sol directamente un día de verano la temperatura en el interior de la célula puede duplicarse a la temperatura ambiente. Por lo tanto es interesante cuantificar cómo afecta a la medida.

Para medir la temperatura a la que se encuentra la célula vamos a utilizar el sensor de temperatura LM35.



El LM35 es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de 1°C. Puede medir temperaturas en el rango que abarca desde -55° a + 150°C. La salida es muy lineal y cada grado centígrado equivale a 10 mV en la salida.

Sus características más relevantes son:

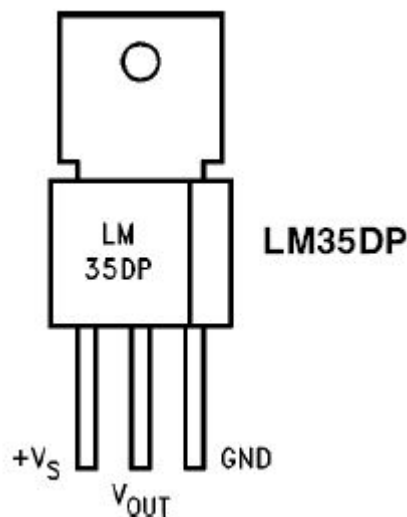
- Precisión de ~1,5°C (peor caso), 0.5°C garantizados a 25°C.
- No linealidad de ~0,5°C (peor caso).
- Baja corriente de alimentación (60uA).
- Amplio rango de funcionamiento (desde -55° a + 150°C).
- Bajo costo.
- Baja impedancia de salida.

Su tensión de salida es proporcional a la temperatura, en la escala Celsius. No necesita calibración externa y es de bajo costo. Funciona en el rango de alimentación comprendido entre 4 y 30 voltios.

Como ventaja adicional, el LM35 no requiere de circuitos adicionales para su calibración externa cuando se desea obtener una precisión del orden de $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente, y $\pm 0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un rango de temperatura desde $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La baja impedancia de salida, su salida lineal y su precisa calibración inherente hace posible una fácil instalación en un circuito de control.

Debido a su baja corriente de alimentación ($60\mu\text{A}$), se produce un efecto de autocalentamiento reducido, menos de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en situación de aire estacionario.



Tiene tres pines: alimentación (V_s), tierra (GND) y salida (OUT).

Alimentamos el LM35 con una pila de 9 V y lo colocamos en contacto con el cristal de la parte superior de la célula. La máxima temperatura que se obtiene durante el experimento es de 63°C , en las horas centrales de un día de julio.

Para cuantificar realmente el efecto que la temperatura hace sobre la medida, vamos a elevar artificialmente la temperatura de la célula y comparar los resultados a diferentes temperaturas para un mismo nivel de iluminación.

Para ello usaremos un “horno” formado por un pequeño habitáculo cerrado en el que se colocará la célula (con el circuito de amplificación) y una bombilla en su interior. Se enciende la bombilla y la temperatura en el interior va aumentando progresivamente, se toman datos a diferentes temperaturas, hasta que alcanza 68°C .

A continuación se apaga la bombilla la temperatura comienza a descender, tomamos datos en las mismas temperaturas que con la bombilla encendida.

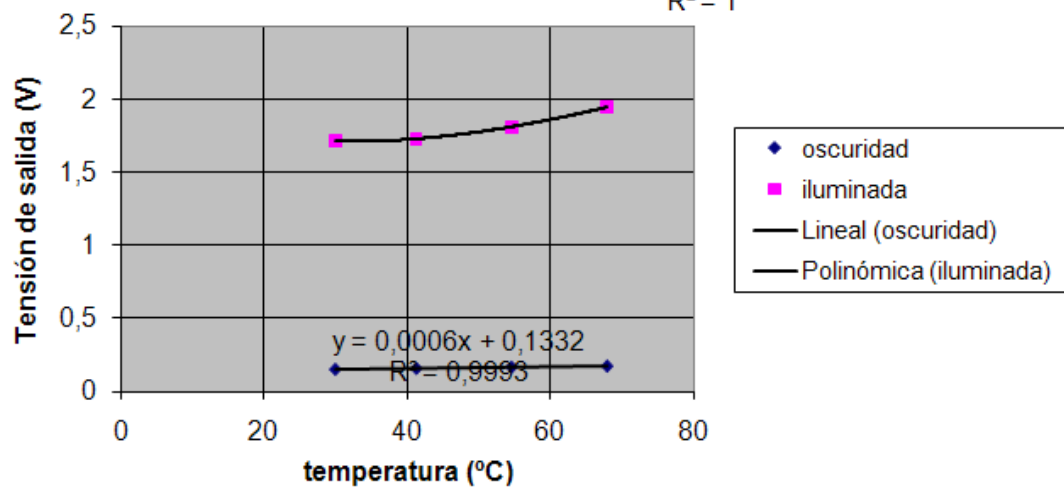
Se obtienen los siguientes resultados:

Temp (°C)	Tensión oscuro	Tensión luz
17,32	0,139	1,799
30	0,15	1,71
41,32	0,156	1,726
54,64	0,164	1,809
68	0,171	1,943

Célula solar de silicio policristalino

$$y = -1E-06x^3 + 0,0004x^2 - 0,0197x + 2,0047$$

$$R^2 = 1$$



Cuando la bombilla está apagada (bajo nivel de radiación) la tensión de salida crece linealmente cuando aumentamos las temperatura y cuando la bombilla está encendida (alto nivel de radiación) la tensión de salida crece acorde a una ecuación de tercer grado.

4.2. Linealidad

Para obtener resultados válidos es importante conocer si la tensión de salida y la irradiancia medida por la estación meteorológica son proporcionales mediante una relación constante.

Para comprobar si existe linealidad en la lectura vamos a medir la radiación durante 1 hora y en días posteriores a ésta medición, y compararla con los datos que nos da la estación meteorológica.

Como se decía en el punto 3.3.1. *La estación meteorológica*, los datos que ofrece la página web son cada 10 minutos, el piranómetro toma valores cada 2 segundos y hace la media de los últimos 10 minutos. Para poder comparar las medidas de la estación con la lectura de la célula hay que seguir el mismo procedimiento. Para ello utilizaremos un registrador de datos, que almacena los valores de tensión de la célula durante un periodo de tiempo.

Lo primero que hay que hacer es ajustar la hora del registrador de datos con la de la estación meteorológica, para ello usamos una página web que nos muestra la hora de un reloj atómico (http://www.la-hora.org/reloj_atómico.php).

El registrador de datos toma valores cada segundo, mientras que la estación lo hace cada dos segundos, así que sólo tendremos en cuenta la mitad de los datos que nos da el registrador.

Los datos que se obtienen son:

	A	B	C
1	Time	Voltage(Volts)	Alternada
2	11:10:01	2,25	2,25
3	11:10:02	2,25	0,00
4	11:10:03	2,25	2,25
5	11:10:04	2,25	0,00
6	11:10:05	2,25	2,25
7	11:10:06	2,25	0,00
8	11:10:07	2,25	2,25
9	11:10:08	2,25	0,00
10	11:10:09	2,25	2,25
11	11:10:10	2,25	0,00
12	11:10:11	2,25	2,25
13	11:10:12	2,25	0,00
14	11:10:13	2,25	2,25
15	11:10:14	2,25	0,00
16	11:10:15	2,25	2,25

Con los valores cada dos segundos del registrador hacemos la media cada diez minutos y podemos comparar con los datos de la estación.

Midiendo durante una hora obtenemos:

hora	media (V)	radiación real	relacion (W/m2)/V
11:20	2,2902	519,80	226,97
11:30	2,3837	530,60	222,60
11:40	2,4397	542,90	222,53
11:50	2,5002	556,00	222,39
12:00	2,5705	561,30	218,36
12:10	2,6093	571,60	219,06
12:20	2,6460	583,10	220,37
12:30	2,6555	588,90	221,77

Éstas mediciones se han realizado con ángulos de altura solar mayores de 25°, sin embargo tomando datos con ángulos de altura solar bajos los resultados son diferentes:

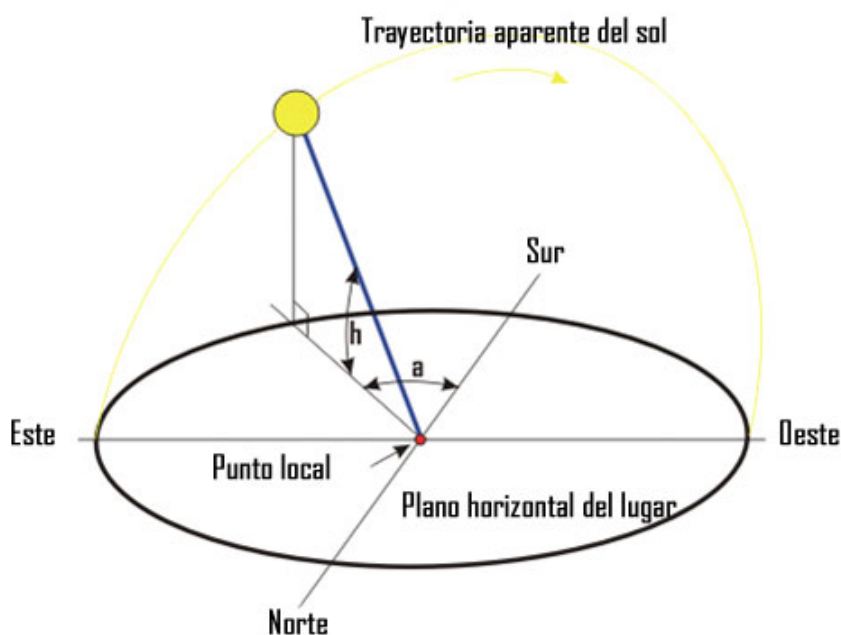
hora	media (V)	radiacion	relacion (W/m2)/V
08:30	0,8224	52,20	63,47
21:10	0,6496	27,90	42,95

Por lo tanto, se puede concluir que la célula no responde de forma lineal a la irradiancia debido al efecto de la temperatura, ángulo de incidencia, ángulo acimutal, etc. Además se aprecia que el efecto del ángulo de incidencia distorsiona la medida en mayor magnitud que el resto de factores.

4.3. Ángulo acimutal

En astronomía, acimut es el ángulo medido sobre el horizonte que forman el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte. Se mide en grados desde el Sur en sentido: Sur-Este-Norte-Oeste, correspondiéndoles los valores (en grados) de: Sur 0°, Este 90°, Norte 180°, Oeste 270°.

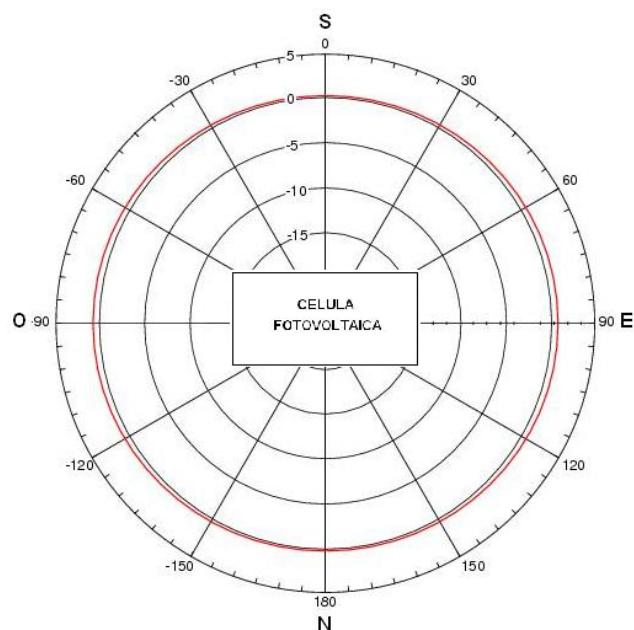
En la siguiente figura el ángulo acimutal es “a”.



Es una de las dos coordenadas horizontales, siendo la otra la altura. La altura y el acimut son coordenadas que dependen de la posición del observador. Es decir que en un mismo momento, un astro es visto bajo diferentes coordenadas horizontales por diferentes observadores situados en puntos diferentes de la Tierra. Esto significa que dichas coordenadas son locales.

Para observar cómo afecta el ángulo de acimut a la medición, vamos a orientar la célula de diferentes maneras y comprobar cómo varían los resultados.

Utilizando una brújula, se coloca la célula de forma que su lado mayor esté perpendicular al sur:



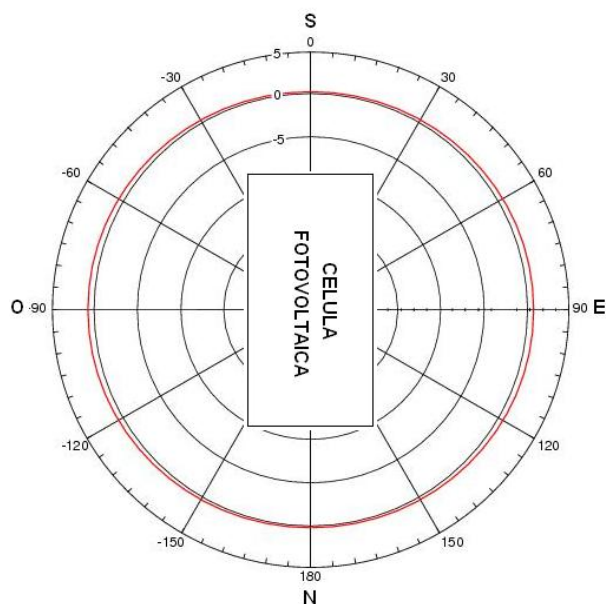
Haciendo mediciones en diferentes ángulos acimutales se observa que la señal no sigue una relación constante con respecto al nivel de radiación que indica la estación meteorológica. Sin embargo, se observa que ésta relación alcanza valores cercanos los de la medición anterior (en torno a 220 W/m²/V), en las horas cercanas al mediodía solar, cuando el ángulo de acimut es cercano a 0°.

acimut °	media (V)	radiación	relación (W/m ²)/V
-34	1,2231	346,60	283,38
4	2,7158	608,00	223,88
26	1,5834	429,90	271,50

Medición del punto anterior (4.2. Linealidad):

hora	media (V)	radiación real	relacion (W/m ²)/V
11:20	2,2902	519,80	226,97
11:30	2,3837	530,60	222,60
11:40	2,4397	542,90	222,53
11:50	2,5002	556,00	222,39
12:00	2,5705	561,30	218,36
12:10	2,6093	571,60	219,06
12:20	2,6460	583,10	220,37
12:30	2,6555	588,90	221,77

Colocando la célula de forma que su lado menor esté perpendicular al sur:



No existe una relación constante entre la medida y los datos de la estación y en ningún momento ésta relación se acerca al valor medio de 220 W/m²/V.

acimut°	media (V)	radiación	relación (W/m ² /V)
-22	1,5718	500,30	318,30
-2	2,0986	721,00	343,56
36	1,4989	457,00	304,89

Cómo en el primer caso cuando el ángulo de acimut era cercano a 0° se obtenía una relación cercana a la estándar, se decide orientar la célula de forma que la proyección del sol sobre la horizontal sea perpendicular al lado mayor de la célula. Se observa que colocando la célula de ésta forma el error es menor.

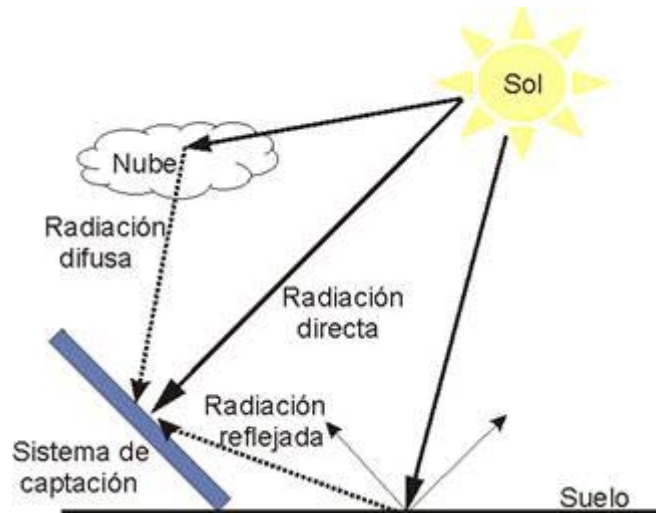
acimut °	media (V)	radiación	relación (W/m ² /V)
-17	2,0870	458,60	219,74
-3	2,8186	629,00	223,16
24	1,8713	412,80	220,60

Existen bases de datos en las que dadas unas coordenadas se puede conocer el ángulo acimutal en las diferentes horas del día, o bien se puede orientar directamente la célula en la dirección del sol, para mediciones puntuales. Sin embargo, para mediciones con una duración tendríamos que aplicar factores de corrección a la medida.

4.4. Radiación directa y difusa

Como se ha explicado anteriormente, la célula recibe radiación global, es decir, radiación directa y radiación difusa. Es interesante conocer la cantidad de cada tipo de radiación que recibe la célula, ya que la radiación directa es común para la estación meteorológica y para la célula pero la radiación difusa es propia del entorno en el que se encuentra el medidor. Por éste motivo se van a hacer mediciones anulando la radiación difusa y sin anularla, es decir se va a medir la radiación directa y la radiación global para poder compararlas.

Recordemos que la radiación difusa es aquella que no proviene directamente del sol, sino que viene reflejada por las nubes, arboles, casas, suelo, etc. Por lo tanto su ángulo de incidencia sobre la célula será diferente al de la radiación directa.

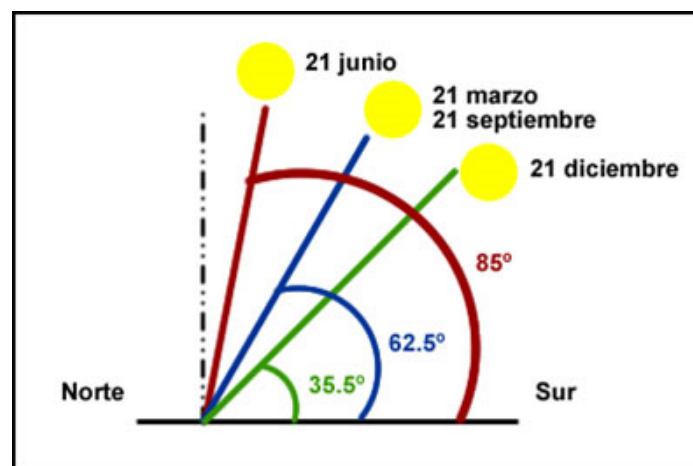


Para evitar que la radiación difusa llegue a la célula, se va a colocar dentro de un recipiente de cerrado con una pequeña abertura de forma que los rayos solares pasen por ella e incidan directamente sobre la célula. Para que el propio recipiente no refleje los rayos solares se va a forrar su interior con tela de color negro, ya que el negro es el color que más absorbe la luz y la energía y los rayos que refleje serán mínimos.

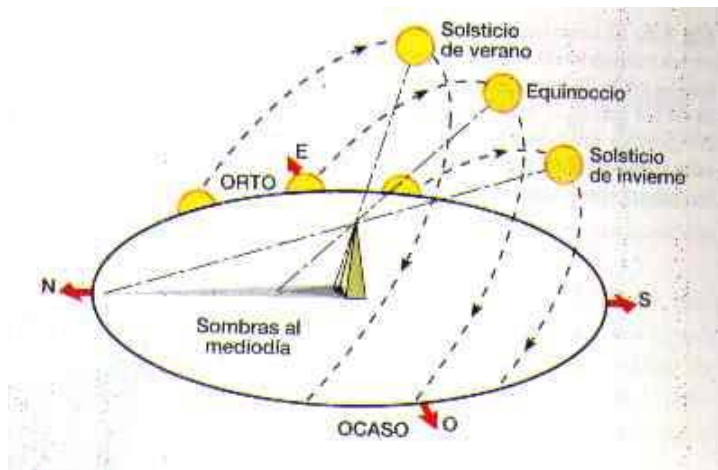
Se van a comparar mediciones de radiación global y de radiación directa a lo largo del estudio del ángulo de incidencia, en el siguiente punto.

4.5. Ángulo de incidencia (error de coseno)

Como se ha explicado, el acimut es una de las dos coordenadas horizontales, la otra es la altura. A lo largo del día el sol se sitúa a diferentes alturas, cuando amanece por el Este se considera que la altura del sol es 0° , conforme va pasando el día asciende hasta que alcanza un máximo, es lo que se conoce como mediodía solar. A partir de ese momento va descendiendo hasta que se oculta por el Oeste.



Éste movimiento se repite cada día pero el ángulo de altura máximo varía con el paso de los días. En el solsticio de verano éste ángulo es máximo y en el solsticio de invierno es mínimo. Entre el solsticio de verano y el de invierno el ángulo de altura máximo disminuye cada día y entre el solsticio de invierno y el de verano aumenta.



Cuando el sol se encuentra a una altura muy baja (amaneciendo o atardeciendo) el ángulo de altura es tan bajo que los rayos solares se reflejan en la protección de cristal de la célula. Esto se traduce en que la lectura en estas situaciones será menor de la esperada.

Por este motivo es interesante estudiar la respuesta de la célula en los diferentes ángulos de incidencia de los rayos solares.

La altura del sol, al igual que el ángulo de acimut, son datos propios de cada situación geográfica y existen bases de datos en las que poder consultarlos. Las variables a introducir son latitud, longitud, altitud, fecha y hora.

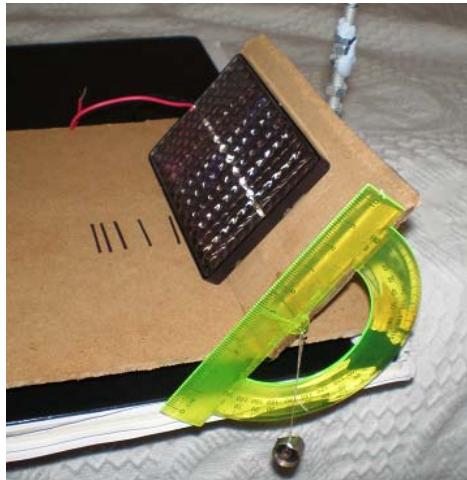
Conocido pues el ángulo de altura, se pueden hacer mediciones con varios ángulos de inclinación de la célula para tener datos de diferentes ángulo de incidencia.



Lógicamente se espera que con un ángulo de incidencia de 90° (perpendicular al sol) la tensión de salida alcance un máximo y a medida que desciende el ángulo vaya descendiendo. El estudio se centra en cómo es ese descenso (exponencial, lineal, logarítmico...).

Los diferentes ángulos de inclinación que se van a experimentar son 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° y 80° . Además se van a comparar mediciones de radiación global y de radiación directa para asegurarse que la totalidad de los rayos solares siguen la misma dirección y compararlas con las de radiación global.

Para medir la inclinación de la célula se va a utilizar un transportador de ángulos unido a una superficie plana. Del transportador cuelga una pesa que será el que marque el ángulo de inclinación. Ésta superficie se apoya sobre una varilla roscada que está sujeta a la base y tiene varias tuercas fijas que facilitan el apoyo de la superficie inclinada con la varilla. De esta forma conseguimos que se pueda cambiar la inclinación de forma muy rápida y así tomar un ángulo de altura del sol común a todas las mediciones.

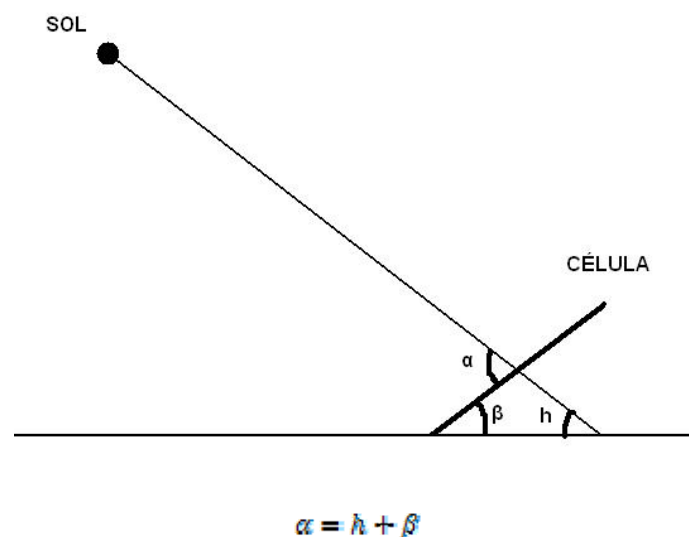


Si definimos:

h , ángulo de altura del sol

β , ángulo de inclinación de la célula

α , ángulo de incidencia



Si $\alpha \geq 90^\circ$ se tomará como ángulo de incidencia su suplementario, esto es porque a efectos prácticos un ángulo de incidencia de 94° equivale a 86° ya que ambos se “desvían” 4° de la perpendicular.

La Ley de Lambert relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción.

Según ésta ley, la tensión de salida será mayor cuanto más cerca de 90° sea el ángulo de incidencia, es decir, cuando la célula reciba los rayos del sol perpendicularmente la tensión de salida alcanzará un máximo.

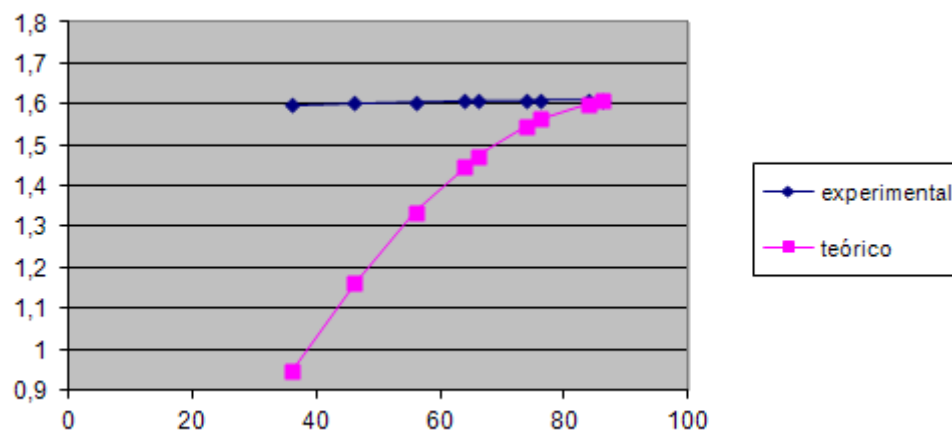
La ley de Lambert nos dice que:

$$V = V_{\max} * \sin \frac{\alpha \pi}{180}$$

Una vez conocido el valor teórico que deberá tener la señal de salida, se procede a experimentar el efecto de la radiación difusa. Se realizan dos mediciones obteniendo los siguientes resultados:

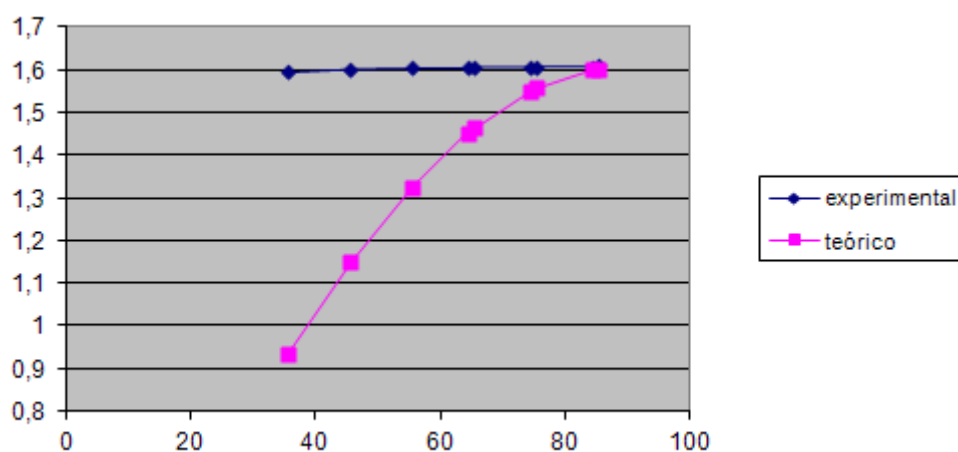
Radiación global:

inclinación célula	Tensión de salida	ángulo de incidencia			valor teórico
0	1,598	36°05′	36,083	1,598	0,94822012
10	1,602	46°05′	46,083	1,602	1,159756
20	1,605	56°05′	56,083	1,605	1,33605329
30	1,607	66°05′	63,917	1,607	1,44603449
40	1,609	76°05′	66,083	1,607	1,47175527
50	1,61	86°05′	73,917	1,608	1,54698684
60	1,609	83°55′	76,083	1,609	1,56273871
70	1,608	73°55′	83,917	1,609	1,60093478
80	1,607	63°55′	86,083	1,61	1,60623913



Radiación directa:

inclinación célula	Tensión de salida	ángulo de incidencia			valor teórico
0°	1,596	35°33′	35,55	1,596	0,9349124
10°	1,602	45°33′	45,55	1,602	1,14788983
20°	1,604	55°33′	55,55	1,604	1,32598921
30°	1,606	65°33′	64,45	1,605	1,45075247
40°	1,607	75°33′	65,55	1,606	1,46379908
50°	1,608	85°33′	74,45	1,606	1,54914218
60°	1,607	84°27′	75,55	1,607	1,55713216
70°	1,606	74°27′	84,45	1,607	1,60046198
80°	1,605	64°27′	85,55	1,608	1,60315256

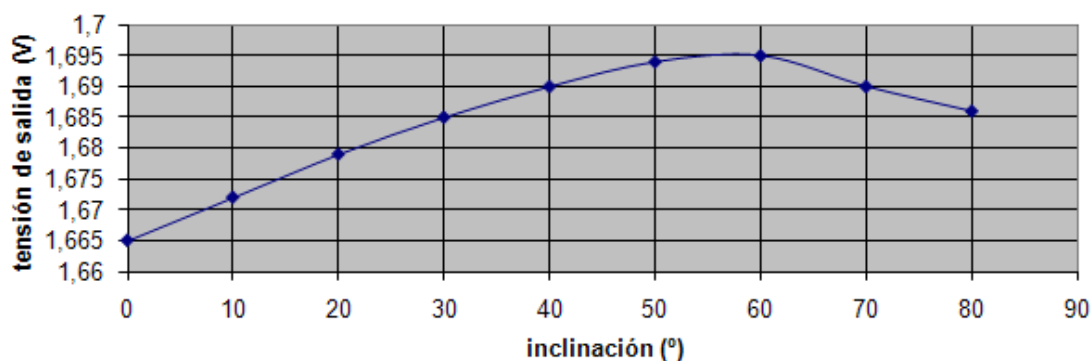


La respuesta de la señal no sigue con precisión los valores teóricos en ninguno de los dos casos. Por éste motivo no se puede cuantificar con total precisión el efecto de la radiación difusa. Sin embargo, se puede apreciar que su efecto en la medida es menor que el del ángulo de incidencia.

Se decide hacer otra medición para confirmar que el funcionamiento de la célula no sigue la ley de Lambert. La altura solar media durante la medición es de 34,083°. Los resultados son los siguientes:

Inclinación (°)	Tensión de salida (V)
0	1,665
10	1,672
20	1,679
30	1,685
40	1,69
50	1,694
60	1,695
70	1,69
80	1,686

MEDIDAS EXPERIMENTALES

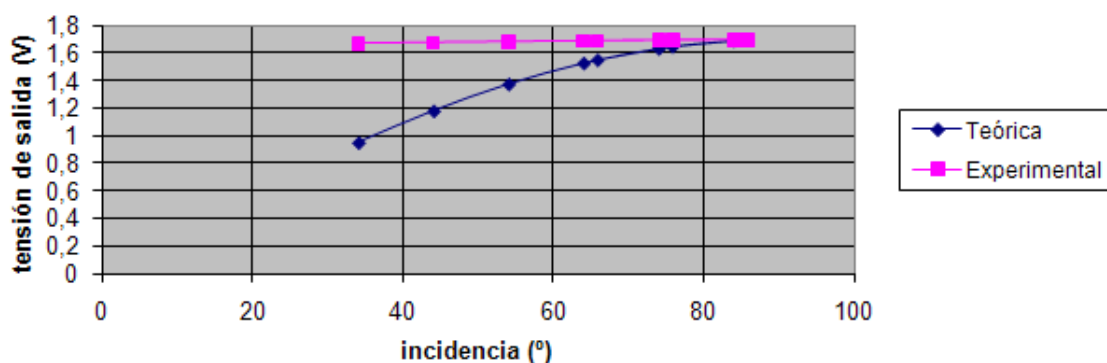


La salida máxima debería producirse cuando la radiación incide perpendicularmente a la célula. Esto ocurre idealmente cuando la inclinación de la célula es de $55,917^\circ$. Los datos experimentales confirman este hecho.

Partimos ahora del dato máximo de tensión de salida, correspondiente a un ángulo de inclinación de 60° y a un ángulo de altura medio teórico de $34,083^\circ$ sobre la horizontal.

incidencia (°)	Tensión de salida teórica (V)	Tensión de salida experimental (V)	inclinación (°)
34,083	0,949866609	1,665	0
44,083	1,179210981	1,672	10
54,083	1,372725624	1,679	20
64,083	1,524530693	1,685	30
74,083	1,630013669	1,69	40
84,083	1,685969505	1,694	50
85,917	1,695	1,695	60
75,917	1,644055512	1,695	70
65,917	1,547459218	1,686	80

LEY DE LAMBERT



Tras observar los resultados se puede asegurar que la célula no sigue la ley de Lambert, posiblemente por el recubrimiento de cristal que la protege. El recubrimiento es bueno para la generación de energía eléctrica porque las lentes de aumento que lo forman mejoran su rendimiento, pero al mismo tiempo provocan una medición errónea.



Sin embargo, con las medidas experimentales y con los valores teóricos se podrían calcular factores de corrección para diferentes valores de altura solar.

5. Análisis de resultados

Tras analizar el efecto de los diferentes factores en la medida, se llega a la conclusión de que el ángulo de incidencia es, con diferencia, el factor a tener más en cuenta puesto que los datos obtenidos en las medidas son los que más alejados están de los valores teóricos (ley de Lambert).

En resumen, se sacan las siguientes conclusiones:

- Ángulo de incidencia: es el que más afecta a la medida. Para un ángulo de incidencia de 34°, el factor de corrección a aplicar sería:

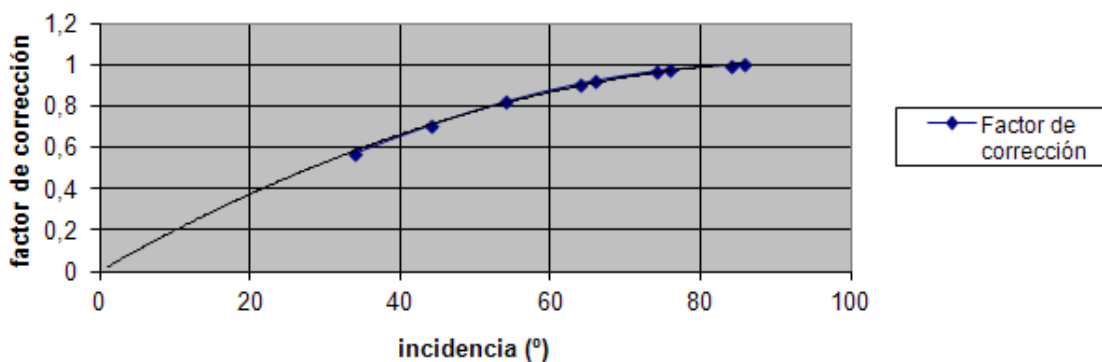
$$\frac{\text{Valor teórico}}{\text{Valor experimental}} = \frac{0,9496 \text{ V}}{1,665 \text{ V}} = 0,57$$

Viendo la gráfica se puede comprobar que a medida que el ángulo de incidencia sea menor, el factor de corrección a aplicar tendería a cero.

incidencia (°)	Tensión de salida teórica (V)	Tensión de salida experimental (V)	inclinación (°)	corrección
34,083	0,949866609	1,665	0	0,57049046
44,083	1,179210981	1,672	10	0,70526973
54,083	1,372725624	1,679	20	0,81758524
64,083	1,524530693	1,685	30	0,90476599
74,083	1,630013669	1,69	40	0,96450513
84,083	1,685969505	1,694	50	0,99525945
85,917	1,695	1,695	60	1
75,917	1,644055512	1,695	70	0,96994425
65,917	1,547459218	1,686	80	0,91782872

Factor de corrección

$$y = -0,0001x^2 + 0,0207x$$

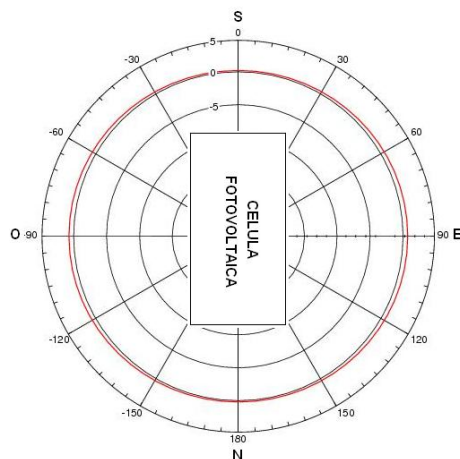


- Ángulo acimutal: es el segundo factor que más afecta a la medida. Colocando la célula de forma que su lado mayor esté orientado al sur, obteníamos los siguientes resultados:

acimut°	media (V)	radiación	relación (W/m2)/V
34	1,2231	346,60	283,38
4	2,7158	608,00	223,88
26	1,5834	429,90	271,50

Cuando estaba orientada de con su lado menor hacia el sur obteníamos:

acimut°	media (V)	radiación	relación (W/m2)/V
-22	1,5718	500,30	318,30
-2	2,0986	721,00	343,56
36	1,4989	457,00	304,89

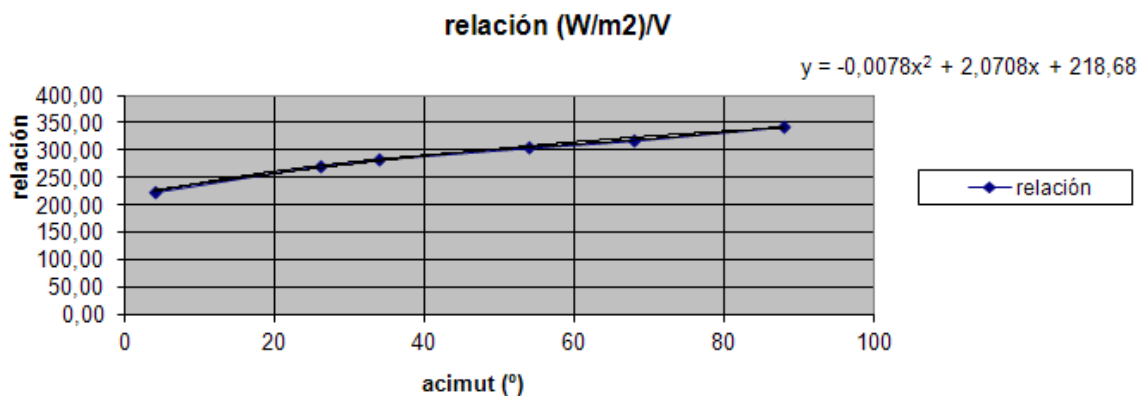


Para comparar éstos resultados con los de la otra orientación hacemos la equivalencia de ángulos, poniendo como ángulo 0° aquel que corta la célula por su lado mayor.

acimut°	media (V)	radiación	relación (W/m2)/V
68	1,5718	500,30	318,30
88	2,0986	721,00	343,56
54	1,4989	457,00	304,89

Es necesario destacar que éstas mediciones se han realizado inclinando la célula un ángulo tal que para cada medida los rayos incidían perpendicularmente a la célula, evitando así el efecto del ángulo de incidencia.

Representando las mediciones de las dos orientaciones:



De la fórmula:

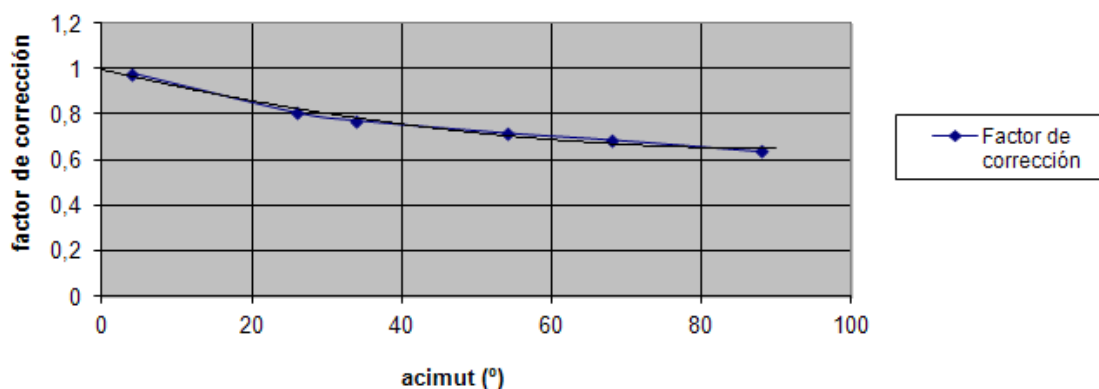
$$y = -0,0078x^2 + 2,0708x + 218,68$$

sabemos que para un ángulo de acimut de 0°, la relación entre la radiación y la tensión de salida es de 218,68. Tomando ese valor como válido calculamos los factores de corrección a partir de él.

acimut°	media (V)	radiación	relación (W/m2)/V	corrección
4	2,7158	608,00	223,88	0,97679464
26	1,5834	429,90	271,50	0,80543827
34	1,2231	346,60	283,38	0,77168929
54	1,4989	457,00	304,89	0,71724169
68	1,5718	500,30	318,30	0,68703023
88	2,0986	721,00	343,56	0,63650742

Factor de corrección

$$y = 4E-05x^2 - 0,0077x + 0,9949$$



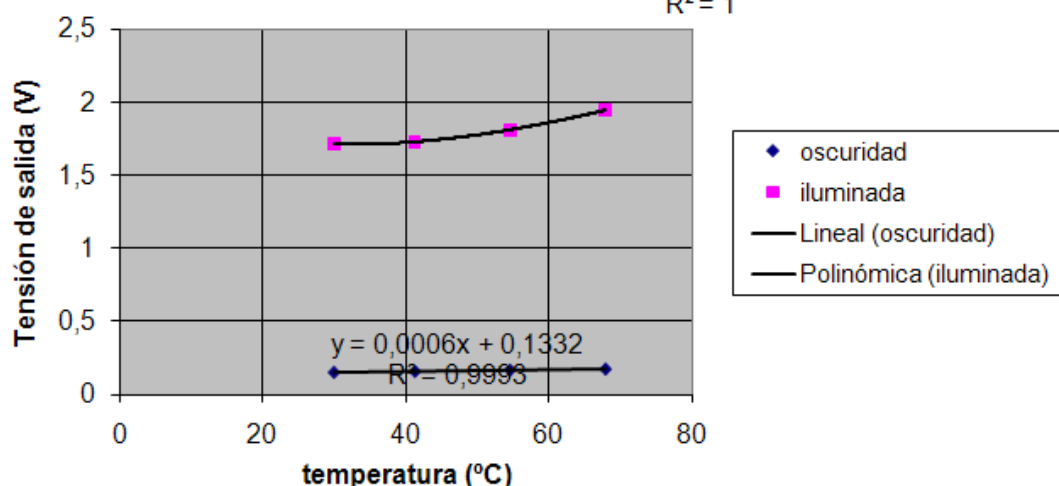
- Temperatura: es el tercer factor en cuanto a importancia, la tensión de salida aumenta cuando aumenta la temperatura según la ecuación:

$$y = -1E-06x^3 + 0,0004x^2 - 0,0197x + 2,0047$$

Célula solar de silicio policristalino

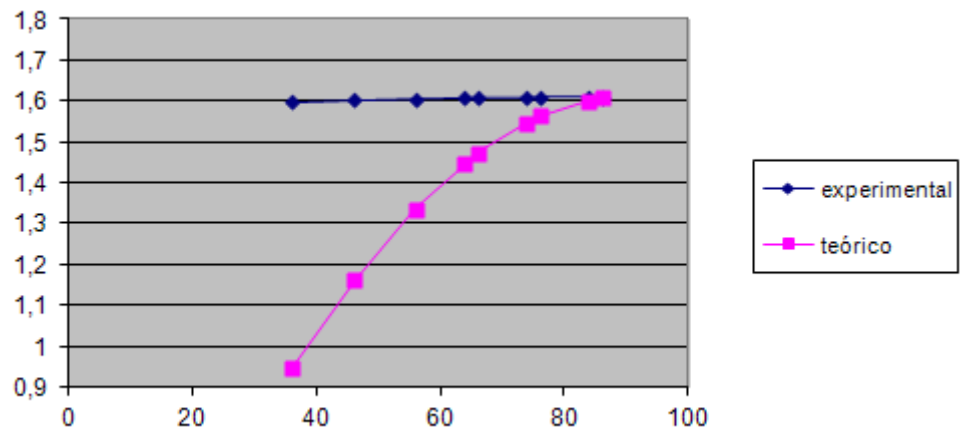
$$y = -1E-06x^3 + 0,0004x^2 - 0,0197x + 2,0047$$

$$R^2 = 1$$

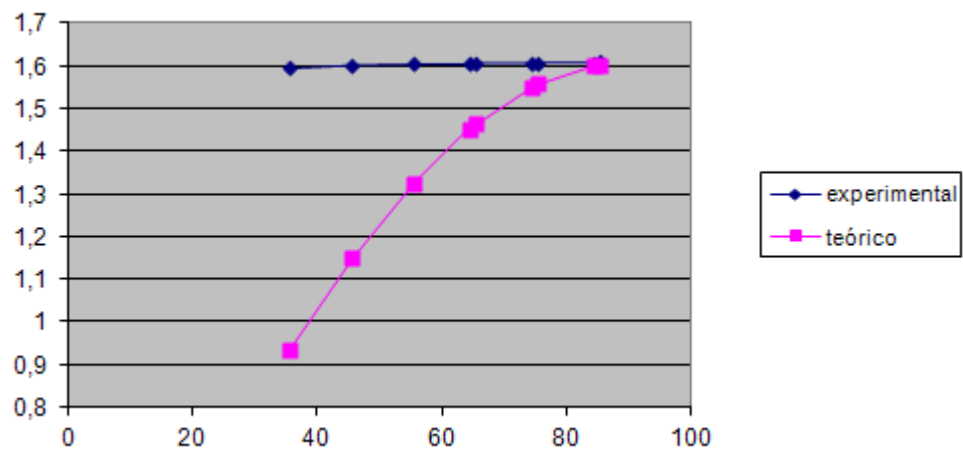


- Radiación directa y radiación difusa: es el siguiente factor a tener en cuenta y el más complicado de cuantificar, puesto que depende del entorno en el que se realice la medición. Como veíamos en las gráficas, los valores de radiación global y directa no presentaban grandes diferencias.

Radiación global:



Radiación directa:



- Linealidad: la célula no responde de forma lineal a la radiación debido al conjunto de factores que interfieren en la señal: ángulo de incidencia, ángulo acimutal, temperatura y radiación difusa.

6. Posibles aplicaciones

Con un adquisidor de datos podemos convertir la señal analógica (tensión de salida) en una señal digital y conectándola a un ordenador procesarla para aplicar los distintos factores de corrección.



Además con el mismo adquisidor de datos podemos procesar la señal de temperatura que nos da el LM35 y corregir la tensión de salida de acuerdo a la ecuación de la temperatura.

Existen multitud de programas que calculan la altura solar en un lugar y tiempo concreto, sabemos que la altura solar se rige por la siguiente fórmula:

$$\sin \theta_s = \cos h \cos \delta \cos \Phi + \sin \delta \sin \Phi$$

donde:

- θ_s es el ángulo de elevación solar
- h es el ángulo horario actual, depende de la hora
- δ es la actual declinación solar, depende del día
- Φ es la latitud local, depende de la posición

Con todos estos datos podríamos calcular la radiación solar, corrigiendo la medida en tiempo real.

7. Estudio económico

7.1. Piranómetro “comercial”

Los piranómetros utilizados en las estaciones meteorológicas son del tipo termoelectrónico, se caracterizan por tener una alta precisión, sensibilidad plana y no ser muy sensibles a pequeñas irregularidades en el nivel de radiación debido a la inercia térmica.

Como ejemplo de piranómetro termoelectrónico se va a analizar el *LP PYRA 03* de *Delta Ohm*, sus características son:

Es un piranómetro de Clase 2a, producido de acuerdo con la norma ISO 9060.

Su funcionamiento se basa en un sensor a termopila. La superficie sensible de la termopila está pintada con un barniz negro opaco, que permite al instrumento no ser selectivo a todas las diferentes longitudes de onda. El campo espectral del piranómetro se determina mediante la transmisión de los dos cúpulas de cristal tipo K5. La superficie negra de la termopila absorbe la energía radiante, creando de esta manera una diferencia de temperatura entre el centro de la termopila (junta caliente) y el cuerpo del piranómetro (junta fría). La diferencia de temperatura entre la junta caliente y la junta fría, se convierte en una Diferencia de Potencial, gracias al efecto Seebeck.

LP PYRA 03 está equipado con una cúpula de un diámetro exterior de 32 mm y un espesor de 4mm, para garantizar un correcto aislamiento térmico de la termopila, evitando el enfriamiento por viento, y para reducir la sensibilidad a la irradiancia térmica. La cúpula protege la termopila del polvo, que al depositarse encima de la superficie negra, puede modificar su sensibilidad espectral. Para evitar que en particulares condiciones climáticas se pueda formar condensación al interior de la cúpula, se introducen tres pastillas de silicagel – que absorben la humedad - al interior del piranómetro.



- Sensibilidad típica: $10 \mu V/(W/m^2)$
- Impedancia: $33 \Omega \div 45 \Omega$
- Campo de medida: $0-2000 W/m^2$
- Campo de vista: 2π sr
- Campo espectral: $305 \text{ nm} \div 2800 \text{ nm } W/m^2$ (50%)

- Temperatura de trabajo: $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Peso: 0.45 Kg

El precio del piranómetro es de 590,00 € (IVA no incluido).

7.2. Piranómetro fotovoltaico

El precio de los componentes que forman el piranómetro es el siguiente:

<u>Componente</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Precio unidad (€)</u>	<u>Precio total (€)</u>
Célula fotovoltaica	1	11,49	11,49
Placa de montaje del circuito Ariston MB4	1	7,50	7,50
Adquisidor de datos Labjack U3-HV	1	83,62	83,62
Amplificador operacional TL081	2	0,34	0,68
Amplificador operacional LM741	1	0,53	0,53
LM35 (sensor de temperatura)	1	2,57	2,57
Pila 9V	1	2,55	2,55
Rollo cable 0,5 mm ²	1	2,70	2,70
Condensador 100nF	2	0,17	0,34
Resistencia 1 Ω	20	0,04	0,80
Resistencia 2,2 M Ω	2	0,04	0,08
Resistencia 1 M Ω	1	0,09	0,09

Resistencia 10 kΩ	1	0,05	0,05
-------------------	---	------	------

TOTAL	113,00 €
-------	----------

El adquisidor de datos puede ser utilizados para varios proyectos en los que sea necesario convertir una señal analógica en digital, ya que ofrece la posibilidad de conectar varias señales de entrada.

El precio de los componentes del piranómetro (exceptuando el adquisidor de datos) es de 29.38 €, un precio 20 veces inferior al de un piranómetro comercial.

8. Conclusiones

La medición de la irradiancia por medio del efecto fotovoltaico es posible debido a la proporcionalidad entre la corriente de cortocircuito y la irradiancia. Sin embargo, agentes externos como el entorno (posición, ángulo solar...) o la propia construcción de las células fotovoltaicas (cristal con lentes de aumento) hacen necesarias correcciones en la medida.

La precisión del piranómetro fotovoltaico, inferior a la de los piranómetros comerciales, no permite su utilización para uso científico. Sin embargo, la gran diferencia de precios entre ambos piranómetros (~20 veces inferior), hace del piranómetro fotovoltaico un perfecto sustituto para otros casos en los que no se requiere un nivel alto de precisión, como su uso entre aficionados a la meteorología.

9. Bibliografía

Referencias bibliográficas consultadas:

- Manuales de energías renovables. Energía solar térmica / IDAE (Octubre 2006)
- Introducción a los amplificadores operacionales: con aplicaciones a CI lineales / Luces M. Faulkenberry. 1990
- Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales: teoría y aplicación / James M. Fiore. 2002
- Energía solar fotovoltaica / AENOR. 2006
- Células solares y fotocélulas / Rufus P. Turner. 1982
- Montajes electrónicos con células solares / Owen Bishop. 1982
- Crystalline silicon solar cells : advanced surface passivation and analysis / Armin G. Aberle. 2009
- Environmental aspects of solar cell modules: summary report / E. A. Alsema. 1999
- Conversión térmica de la radiación solar / J. M. Chassériaux. 1990
- Solar cells: operating principles, technology and system applications / Martin A. Green. 1998

Páginas web consultadas:

- <http://www.ciemat.es/>
- <http://www.idae.es/>
- <http://meteo.navarra.es/>
- <http://www.portalsolar.com/>
- <http://www.mygeoclock.com/geoclock/>
- <http://www.wikipedia.org/>
- <http://www.enerpoint.es/es/>
- <http://www.alphaomega-electronics.com/>
- <http://www.electan.com/>
- <http://www.micropik.com/>
- <http://www.ariston.es/>
- <http://labjack.com/>
- <http://www.velleman.eu/>